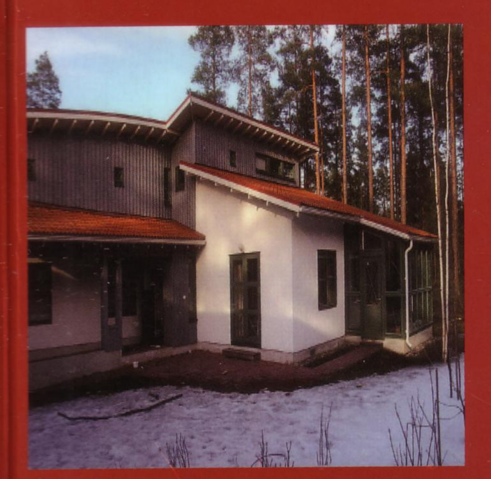
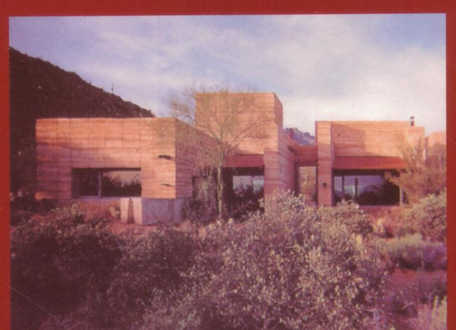
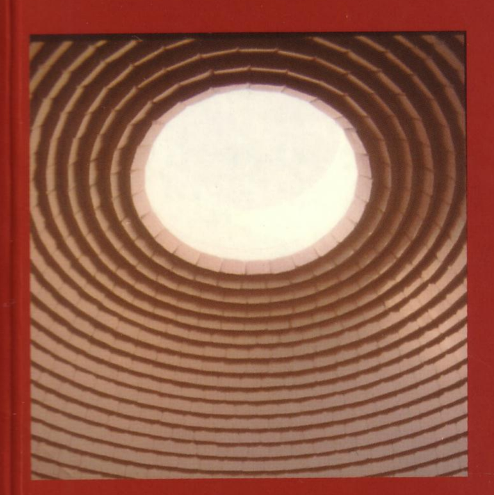


Gernot Minke

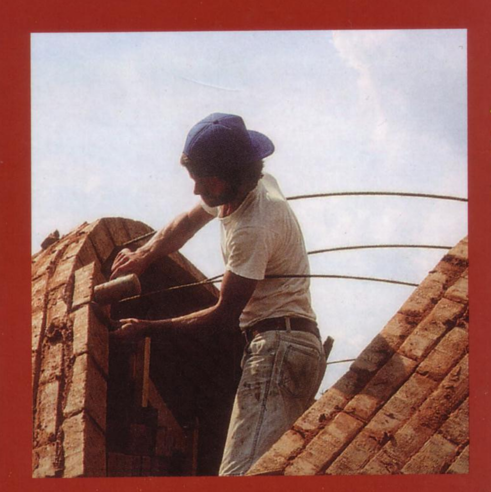




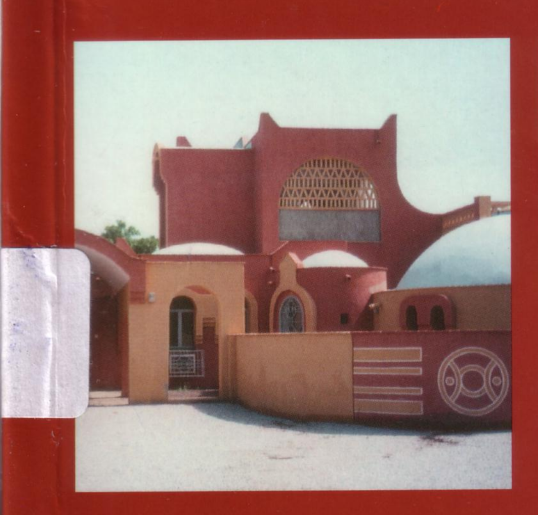
MANUAL DE CONSTRUCCION EN TIERRA



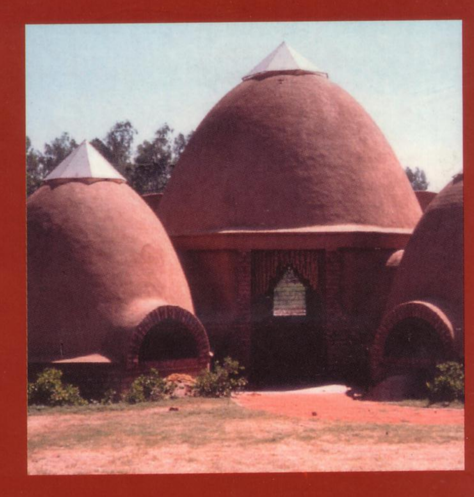




La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual

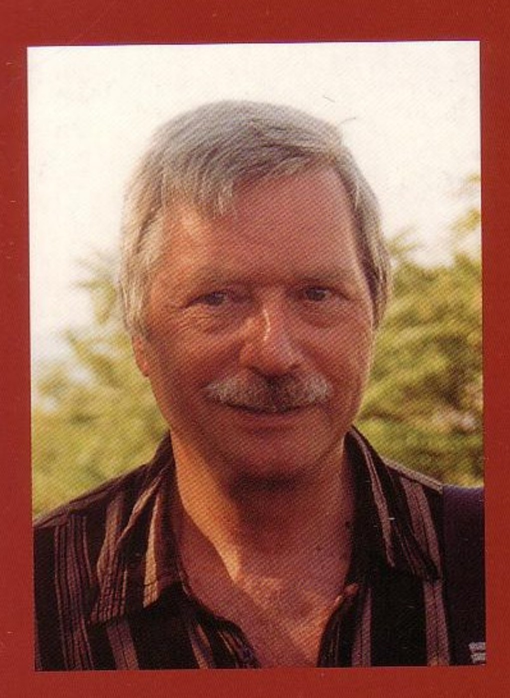








EDITORIAL FIN DE SIGLO



Gernot Minke, arquitecto y catedrático de la Universidad de Kassel, actualmente dirige el Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales. Desde 1974 se han llevado a cabo más de 30 proyectos de investigación y desarrollo en el campo de construcciones ecológicas, viviendas de bajo costo y especialmente en el campo de las construcciones en tierra.
Ha diseñado varias edificaciones particulares y públicas donde el barro es material predominante. Sus obras se encuentran no solo èn Europa, sino también en América del Sur, América Central e India.
Ha publicado varios libros y más de 250 artículos. Ha participado como invitado en más de 40 conferencias internacionales. Asimismo, ha dado numerosos cursos en Argentina, Bolivia, Brasil, Guatemala, India, México, Paraguay y Venezuela y conferencias en diferentes universidades del mundo.

Manual de
CONSTRUCCION EN TIERRA

GERNOT MINKE

Manual de CONSTRUCCION EN TIERRA

La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual



EDITORIAL FIN DE SIGLO

Título original en alemán: *Lehmbau-Handbuch*

Primera edición en castellano, agosto 2001
Segunda edición en castellano, setiembre 2005

Eduardo Acevedo 1624 - Tel. 400 0214
finsiglo@adinet.com.uy - www.entrelibros.com

Traducción: *Kareen Herzfeld*, Uruguay
Rosario Loayza, Perú
Gabriela Peterssen, Cuba

Corrección final: *Kareen Herzfeld*

Armado: *Friedemann Mahlke*, Kassel, Alemania
Javier Fraga, Uruguay

ISBN: 9974-49-347-1

Indice

Prefacio **11**

Agradecimientos **11**

1. Introducción **13**
1.1 La tierra como material de construcción 13
1.2 Sobre la historia de la construcción con barro 13
1.3 Qué debemos saber de la tierra como material de construcción 16
1.4 Mejoramiento del clima interior 19
1.4.1 Generalidades 19
1.4.2 Humedad del aire y salud 19
1.4.3 Influencia del intercambio de aire en la humedad del aire 20
1.4.4 El efecto del barro en el balance de la humedad 20
1.5 Prejuicios contra la tierra como material de construcción 22

2. Propiedades de la tierra como material de construcción **23**
2.1 Composición 23
2.1.1 Generalidades 23
2.1.2 Arcilla 23
2.1.3 Limo, arena y grava 24
2.1.4 Distribución granulométrica 24
2.1.5 Componentes orgánicos 24
2.1.6 Agua 24
2.1.7 Porosidad 24
2.1.8 Superficie específica 25
2.1.9 Densidad 25
2.1.10 Compactibilidad 25
2.2 Ensayos para analizar la composición de la tierra 25
2.2.1 Generalidades 25
2.2.2 Análisis combinado de tamizado y sedimentación 25
2.2.3 Contenido de agua 25
2.2.4 Ensayos de campo 26
2.3 Efectos del agua 29
2.3.1 Generalidades 29
2.3.2 Expansión y retracción 29
2.3.3 Determinación de la retracción lineal 29
2.3.4 Plasticidad 30
2.3.5 Acción capilar 32
2.3.6 Estabilidad en agua estática 33
2.3.7 Resistencia al escurrimiento del agua 33
2.3.8 Erosión por lluvia y congelamiento 34
2.3.9 Período de secado 34
2.4 Efecto del vapor 36
2.4.1 Generalidades 36
2.4.2 Difusión del vapor 36
2.4.3 Equilibrio del contenido de humedad 36
2.4.4 Condensación 37
2.5 Influencia del calor 38
2.5.1 Generalidades 38
2.5.2 Conductividad térmica 38
2.5.3 Calor específico 38
2.5.4 Capacidad térmica 38
2.5.5 Pérdida y ganancia térmica 39
2.5.6 Decrecimiento y retraso térmico 39
2.5.7 Expansión térmica 39
2.5.8 Comportamiento en relación al fuego 40
2.6 Resistencia 40
2.6.1 Cohesividad 40
2.6.2 Resistencia a la compresión 40
2.6.3 Resistencia a la tracción 41
2.6.4 Resistencia a la flexión 41
2.6.5 Adhesión 41
2.6.6 Resistencia a la abrasión 42
2.6.7 Módulo de elasticidad 42
2.7 Valor pH 42
2.8 Radiactividad 42
2.9 Protección a ondas electromagnéticas de alta frecuencia 43

3. Preparación del barro **44**
3.1 Generalidades 44
3.2 Humedecimiento, trituración y mezcla 44
3.3 Tamizado 46
3.4 Disolver barro 46
3.5 Curado 46
3.6 Reducción del contenido de arcilla o rebajado 46

4. Mejoramiento de las características del barro mediante tratamientos especiales y aditivos **47**
4.1 Generalidades 47
4.2 Reducción de las fisuras provocadas por la retracción 47
4.2.1 Generalidades 47
4.2.2 Rebajado con agregados 47
4.2.3 Rebajado con líquidos 48
4.2.4 Adición de fibras 48
4.2.5 Medidas estructurales 48
4.3 Estabilización contra el agua 48
4.3.1 Generalidades 48
4.3.2 Estabilizadores minerales 49
4.3.3 Productos animales 49
4.3.4 Productos animales y minerales 50
4.3.5 Productos vegetales 50
4.3.6 Estabilizadores sintéticos 50
4.4 Incremento de la cohesión 50
4.4.1 Generalidades 50
4.4.2 Mezclado y curado 50
4.4.3 Incremento del contenido de arcilla 50
4.4.4 Aditivos 51
4.5 Incremento de la resistencia a compresión 51
4.5.1 Generalidades 51
4.5.2 Preparación 51
4.5.3 Compactación 52
4.5.4 Aditivos minerales 53
4.5.5 Aditivos orgánicos 55
4.5.6 Adición de fibras 56

4.6 Resistencia a la abrasión ... 56
4.7 Incremento del aislamiento térmico ... 56
4.7.1 Generalidades ... 56
4.7.2 Barro alivianado con paja ... 57
4.7.3 Barro alivianado con agregados minerales ... 58
4.7.4 Barro alivianado con corcho ... 59
4.7.5 Barro alivianado con madera ... 59
4.7.6 Barro espumoso ... 59

5. Tierra apisonada (Tapial) ... 60
5.1 Generalidades ... 60
5.2 Encofrados ... 61
5.3 Herramientas ... 62
5.4 Proceso de construcción ... 65
5.5 Ejecución de vanos ... 65
5.6 Nuevas técnicas para construcción de muros ... 65
5.6.1 Paneles de barro apisonado ... 65
5.6.2 Técnicas altamente mecanizadas ... 67
5.6.3 Estructura de entramado con relleno de barro apisonado ... 68
5.6.4 Construcciones con encofrado perdido ... 68
5.7 Cúpulas de barro apisonado ... 70
5.8 Proceso de secado ... 70
5.9 Mano de obra ... 71
5.10 Aislamiento térmico ... 71
5.11 Tratamientos de la superficie ... 71

6. Construcción con adobes ... 72
6.1 Generalidades ... 72
6.2 Historia ... 72
6.3 Elaboración de adobes ... 73
6.4 Dosificación de la mezcla ... 74
6.5 Ejecución de muros ... 77
6.6 Tratamiento de superficie ... 78
6.7 Fijación de elementos en los muros ... 79

7. Adobones y paneles prefabricados ... 80
7.1 Generalidades ... 80
7.2 Adobones ... 80
7.3 Paneles prefabricados para muros ... 82
7.4 Elementos de relleno para losas ... 83
7.5 Adobes para optimizar la acústica ... 84
7.6 Baldosas para pisos ... 85

8. Modelado directo con barro plástico ... 86
8.1 Generalidades ... 86
8.2 Técnicas tradicionales con barro húmedo ... 87
8.3 Panes de barro ... 90
8.4 Técnica del Stranglehm ... 90
8.4.1 Generalidades ... 90
8.4.2 Elaboración de los elementos de Stranglehm ... 90
8.4.3 Preparación de la mezcla ... 92
8.4.4 Colocación de elementos ... 92
8.4.5 Tipos de muros ... 95
8.4.6 Cúpulas ... 96

9. Entramados rellenos con barro plástico ... 99
9.1 Generalidades ... 99
9.2 Bahareque (Quincha) ... 99
9.3 Barro proyectado ... 99
9.4 Estacas enrolladas y botellas de barro ... 100
9.5 Entramados con relleno de barro alivianado ... 102
9.6 Rellenos con barro extruido y con mangueras rellenas de barro alivianado ... 102

10. Técnicas para apisonar, verter y bombear barro alivianado ... 103
10.1 Generalidades ... 103
10.2 Encofrados ... 103
10.3 Muro de tapial de barro alivianado con paja ... 104
10.4 Muro de barro aliviando con chips de madera ... 105
10.5 Muros de barro bombeado alivianado con aditivos minerales ... 105
10.5.1 Generalidades ... 105
10.5.2 Muros compactados ... 106
10.5.3 Muros de barro vertido ... 107
10.5.4 Muros bombeados ... 107
10.5.5 Tratamiento de superficie ... 108
10.6 Pisos de barro alivianado bombeado ... 110
10.7 Bloques rellenos con barro ... 110
10.8 Mangueras rellenas con barro ... 110

11. Revoques de barro ... 113
11.1 Generalidades ... 113
11.2 Preparación de la superficie ... 113
11.3 Composición del revoque ... 114
11.3.1 Generalidades ... 114
11.3.2 Revoques exteriores ... 114
11.3.3 Revoques interiores ... 114
11.4 Reglas para la aplicación de revoques ... 115
11.5 Barro proyectado ... 115
11.6 Revoque de barro alivianado con aditivos minerales ... 115
11.7 Revoque lanzado ... 116
11.8 Revoque en muros de fardos de paja ... 116
11.9 Modelado de revoques de barro en estado húmedo ... 116
11.10 Protección de las esquinas ... 116

12. Protección de superficies de barro contra las inclemencias del tiempo ... 117
12.1 Generalidades ... 117
12.2 Consolidación de la superficie ... 117
12.3 Pinturas ... 117
12.3.1 Generalidades ... 117
12.3.2 Preparación de la superficie ... 117
12.3.3 Mezclas recomendadas para pintura ... 117
12.3.4 Difusión de vapor ... 119
12.3.5 Penetración de agua ... 119
12.4 Cómo hacer superficies hidrófobas ... 120
12.4.1 Aditivos hidrófobos ... 120
12.4.2 Aplicación de aditivos hidrófobos ... 120
12.4.3 Ensayos ... 120
12.5 Revoques de cal ... 120
12.5.1 Generalidades ... 120
12.5.2 Preparación de la superficie ... 121
12.5.3 Reforzamiento ... 121
12.5.4 Composición ... 122
12.5.5 Aplicación ... 122
12.5.6 Efecto sobre la difusión de vapor ... 122
12.6 Ripias, tablazones y otros cubiertas ... 122

12.7 Métodos estructurales 124
12.7.1 Protección contra la lluvia 124
12.7.2 Protección contra la humedad ascendente 124
12.7.3 Protección contra la inundación 124

13. Reparación de elementos de barro 125
13.1 Generalidades 125
13.2 Daños en construcciones de barro 125
13.3 Reparación de grietas y juntas con rellenos de barro 125
13.3.1 Generalidades 125
13.3.2 Mezclas 125
13.3.3 Aplicación de rellenos 125
13.4 Reparación de grietas y juntas con otros materiales de relleno 125
13.4.1 Generalidades 125
13.4.2 Mezclas 125
13.5 Reparación de daños de mayor magnitud 126
13.5.1 Reparación con barro 126
13.5.2 Pinturas 126
13.6 Mejoramiento posterior del aislamiento térmico con barro alivianado 126
13.6.1 Generalidades 126
13.6.2 Condensación 126
13.6.3 Aislamiento térmico 127
13.6.4 Revestimiento de barro alivianado como aislamiento interior 127
13.6.5 Elementos prefabricados 127

14. Diseño de elementos constructivos especiales 128
14.1 Juntas 128
14.2 Diseños especiales para muros 130
14.2.1 Muros de barro con alto aislamiento térmico 130
14.2.2 Muros de llantas rellenas con barro 130
14.2.3 Muros de mangueras rellenas con barro 131
14.3 Entrepisos de barro 133
14.3.1 Entrepisos tradicionales de barro 133
14.3.2 Entrepisos modernos 134
14.4 Pisos de barro apisonado 134
14.4.1 Generalidades 134
14.4.2 Pisos tradicionales 135
14.4.3 Pisos modernos 136
14.5 Cubiertas inclinadas rellenas con barro alivianado 138
14.6 Cubiertas con recubrimientos de barro 138
14.6.1 Generalidades 138
14.6.2 Cubiertas tradicionales 139
14.6.3 Soluciones innovadoras 139
14.7 Bóvedas y cúpulas de adobe 140
14.7.1 Generalidades 140
14.7.2 Geometría 141
14.7.3 Comportamiento estructural 142
14.7.4 Bóvedas nubicas 148
14.7.5 Cúpulas afganas y persas 149
14.7.6 Cúpulas nubicas 150
14.7.7 Cúpulas estructuralmente optimizadas 151
14.7.8 Cúpulas y bóvedas con encofrado 153
14.7.9 Quemado de cúpulas de barro 153
14.7.10 Ejemplos modernos 153
14.8 Muro de almacenamiento térmico 157
14.9 Utilización de barro en baños 157
14.10 Construcción de mobiliario y artefactos sanitarios con barro 157
14.11 Cocinas de barro 159
14.11.1 Cocinas ahorradoras de madera 159
14.11.2 Cocina integrada con cama 161
14.11.3 Horno para pan y pizza 161
14.12 Estanques herméticos de barro 161
14.12.1 Generalidades 161
14.12.2 Tierra apisonada 162
14.12.3 Ladrillos crudos 162

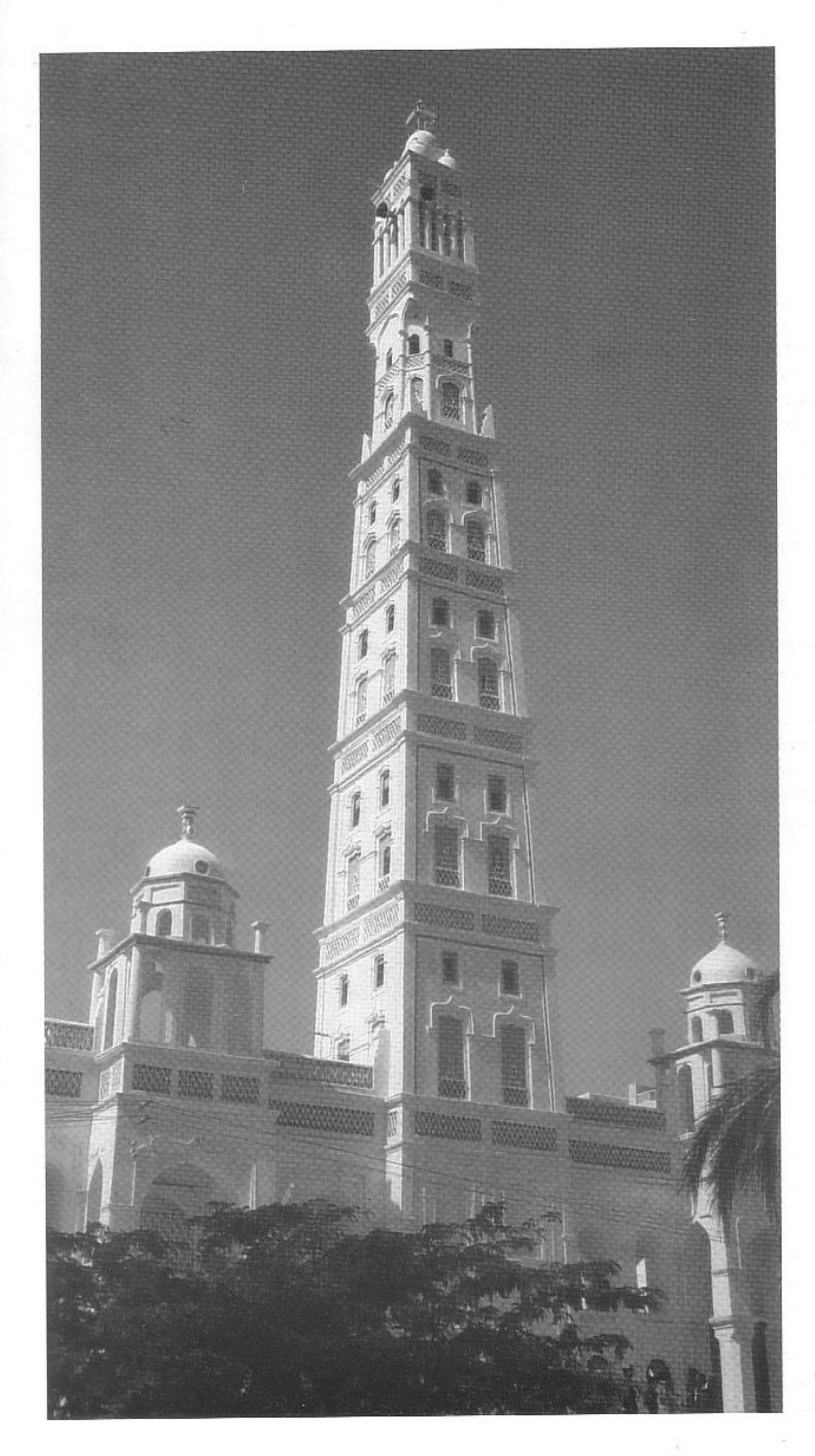
15. Construcciones antisísmicas 163
15.1 Generalidades 163
15.2 Requisitos constructivos y de diseño 163
15.3 Forma de la planta 166
15.4 Muros de tapial reforzados con bambú 168
15.5 Muros de mangueras rellenas con barro 171

16. Ejemplos de construcciones modernas de tierra 172
16.1 Generalidades 172
16.2 Residencia, Hörnerkirchen, Alemania 172
16.3 Residencia en Turku, Finlandia 174
16.4 Viviendas apareadas, Kassel, Alemania 176
16.5 Residencia con estudio, Kassel, Alemania 179
16.6 Casa de campo, Tabio, Colombia 183
16.7 Vivienda de bajo costo, Mount Abu, Rajasthan, India 184
16.8 Residencia Tucson, Arizona, Estados Unidos 186
16.9 Residencia, Túnez, lago Quaroun, Fayoum, Egipto 187
16.10 Residencia, La Paz, Bolivia 188
16.11 Casa de campo, San Pedro, San Pablo, Brasil 190
16.12 Finca, Wazirpur, Haryana, India 191
16.13 Museo Nacional de Mali, Bakamo, Mali 194
16.14 Casita Nuaanarpoq, Taos, Nuevo México, Estados Unidos 195
16.15 Vivienda suburbana, Villa García, Uruguay 196
16.16 Residencia Correas, Petrópolis, TJ, Brasil 198
16.17 Casa de campo, José Ignacio, Maldonado, Uruguay 199
16.18 Posta sanitaria en la comunidad de Nino Yucay, Ayacucho, Perú 200
16.19 Guardería infantil, Sorsum, Alemania 201
16.20 Oficina, Nueva Delhi, India 204
16.21 Instituto Panafricano, Ouagadougou, Burkina Faso (Alto Volta) 206
16.22 Centro educativo, Seguo, Mali 209
16.23 Escuela Solvig, Järna, Suecia 211
16.24 Residencia de estudiantes, Kassel, Alemania 212
16.25 Centro Cultural, La Paz, Bolivia 214
16.26 Centro de salud, Vöhl, Alemania 216

17. Perspectivas futuras 218

18. Referencias bibliográficas 219

19. Créditos fotográficos 222



Torre de la mesquita de Tarim, Yemen. 38 m de altura, construido de adobes hechos a mano

Prefacio

Este manual ha sido escrito debido al creciente interés en la construcción con barro en todo el mundo. Está orientado al estudio de la tierra como material de construcción y proporciona un análisis de sus aplicaciones, técnicas de construcción, datos físicos, explica sus propiedades específicas y las posibilidades de optimizarlas.
Ningún libro de teoría, sin embargo, puede reemplazar la experiencia práctica de construir con barro. Los datos, experiencias y ejemplos de construcción con tierra pueden ser utilizados como bases para todos los procesos de construcción y para su posible aplicación por parte de ingenieros, arquitectos, empresarios, artesanos, autoconstructores o representantes públicos, que quieran construir con el material más antiguo de la humanidad, la tierra.
La tierra, como material de construcción viene en miles de composiciones diferentes que pueden ser procesadas de varias maneras. Barro como se denomina la tierra arcillosa, tiene diferentes nombres según la aplicación, por ejemplo " tierra compactada o apisonada", "bloques de suelo", "bloques de barro" o "adobe".
El Manual de Construcción con Tierra documenta la mayoría de los experimentos desarrollados hasta la fecha, completados y corregidos a través de investigaciones continuas iniciadas en 1978 en el "Forschungslabor für experimentelles Bauen" (FEB) (Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales) de la Universidad de Kassel. Asimismo la presente edición incorpora los desarrollos y experiencias prácticas de la construcción del "Planungsbüro für Ökologisches Bauen", Kassel (el estudio del autor).
Este manual está basado en la versión en alemán ("Lehmbau - Handbuch"). Sin embargo no se trata de una traducción directa sino que ha sido mejorado y actualizado para satisfacer a una audiencia internacional. Algunas secciones han sido incrementadas, se han incluido más proyectos e ilustraciones.

El primer capítulo es una introducción a la tierra como material de construcción, describiendo su rol en la historia y en el futuro. Le sigue un corto repaso a la historia de la arquitectura de tierra. Se listan todas las características significativas que hacen a la tierra diferir de los restantes materiales comunes e industrializados de la construcción. El reciente descubrimiento del uso de la tierra en la construcción para balancear el clima interior se explica detalladamente.
En el segundo capítulo se dan datos del comportamiento físico y estructural del material, la mayoría de ellos recientemente investigados y tomando en cuenta que diferentes mezclas de tierra dan diferentes resultados.
Los capítulos tres y cuatro ofrecen métodos para obtener un material de construcción de sencilla aplicación a partir de un suelo natural y como se puede modificar la mezcla.
Los siguientes siete capítulos describen técnicas utilizadas para construir diferentes elementos y componentes constructivos de tierra.
El capítulo 12 explica como proteger los componentes de tierra de las inclemencias del tiempo. El capítulo 13 ofrece indicaciones para reparar construcciones de tierra.
El capítulo 14 ilustra la variedad de aplicaciones de componentes de tierra optimizados e incluye técnicas innovadoras para la construcción de bóvedas y cúpulas, problemas de diseño, diseño sismoresistente y aplicaciones en la construcción de mobiliario, artefactos sanitarios y hornos.
El capítulo 15 ilustra una variedad de soluciones para construcciones antisísmicas.
El capítulo 16 muestra edificaciones representativas de diferentes países.
El manual concluye con algunos comentarios sobre el futuro de la construcción con tierra y la bibliografía utilizada.

Agradecimientos

El autor desea agradecer a todos los estudiantes y colegas que han contribuido en la investigación y el desarrollo de proyectos en Alemania, Chile, Guatemala, Ecuador, Hungría y la India. Es gracias a estos esfuerzos que este libro contiene tanta información sobre experiencias prácticas.
Agradecimientos especiales a los asistentes de investigación H.G Merz, Ulrich Merz, Klaus Eckart, Ulla Lustig-Rössler, Kiran Mukerji, Ulrich Boemans, Uwe Jaensch, Dittmar Hecken y a Frank Millies, el técnico que construyó la mayoría de los innovadores equipos de ensayo y aditamentos de construcción.

El autor quiere también agradecer a Pawan Kumar y Anke Lubenow quienes ayudaron en la elaboración de los dibujos, Ulrich Boemans, Sigrid Köster, Uwe Jaensch y Friedemann Mahlke que prepararon los dibujos en la computadora, y especialmente a Rosario Loayza, Gabriela Peterssen y Kareen Herzfeld por la redacción y traducción.

Kassel, Julio 2001
Gernot Minke

1.2-2

1.2-3

1. Introducción

1.1 La tierra como material de construcción

En casi todos los climas cálido-secos y templados del mundo, la tierra ha sido el material de construcción predominante. Aún en la actualidad un tercio de la humanidad vive en viviendas de tierra, y en países en vías de desarrollo esto representa más de la mitad.
No ha sido posible resolver los inmensos requerimientos de hábitat en los países en vías de desarrollo con materiales industrializados como ladrillo, hormigón y acero, ni con técnicas de producción industrializadas. No existen en el mundo las capacidades productivas y financieras para satisfacer esta demanda. Las necesidades de hábitat en los países en vías de desarrollo solo se pueden encarar utilizando materiales de construcción locales y técnicas de autoconstrucción.
La tierra es el material de construcción natural más importante y abundante en la mayoría de las regiones del mundo. Este se obtiene frecuentemente directamente en el sitio cuando se excavan los cimientos. En los países industrializados la desmedida explotación de los recursos naturales y los sistemas de producción centralizados intensivos en capital y energía no solo generan desperdicios sino que contaminan el medio ambiente, incrementando el desempleo. En esos países la tierra a resurgido como material de construcción.
Crecientemente las personas que construyen sus viviendas demandan edificaciones eficientes económica y energéticamente, dan mayor valor a la salud y al clima interior balanceado.
Se ha comprendido que la tierra como material de construcción natural tiene mejores cualidades que los materiales industriales como el hormigón, los ladrillos y los silicocalcáreos.
Técnicas de construcción con tierra recientemente desarrolladas demuestran el valor de la tierra no sólo para la autoconstrucción sino también para la construcción industrializada a cargo de contratistas.
Este manual ofrece datos teóricos básicos sobre el material así como guías para las diferentes aplicaciones de la tierra basadas en investigaciones científicas y experiencias prácticas.

1.2 Sobre la historia de la construcción con barro

Las técnicas de construcción con barro datan de hace más de 9000 años. En el Turquestán fueron descubiertas viviendas de tierra del período 8000 - 6000 a.C. (Pumpelly 1908). En Asiria fueron encontrados cimientos de tierra apisonada que datan del 5000 a.C. Todas las culturas antiguas utilizaron la tierra no solo en la construcción de viviendas sino también en fortalezas y obras religiosas.
La Fig. 1.2-1 muestra bóvedas del Templo mortuorio de Ramses II en Gourna, Egipto, construido con adobes hace más de 3000 años. La ciudadela Arge Bam en Irán (Fig. 1.2-2) tiene partes de sus construcciones con 2500 años de antigüedad. También en Marruecos en el valle de Draa hay ciudades fortificados construidas de tierra en el siglo XVIII, ver Fig. 1.2-3.
La Gran Muralla China se construyó hace 4000 años, inicialmente casi toda con tierra apisonada (tapial) y posteriormente fue enchapada con piedras naturales y ladrillos, dándole la apariencia de una muralla de piedra. El centro de la Pirámide del Sol en Teotihuacán, México, está constituido por 2 millones de toneladas de tierra apisonada y fue construida entre los años 300 - 900.
En los climas secos donde la madera es escasa, se desarrollaron en el transcurso de los siglos técnicas de mamposte-



1.2-1 Almacenes, templo de Ramses II, Gourna, Egipto

1.2-4 Gran Mezquita, Mopti, Malí construida en 1935

1.2-5 Mezquita, Kashan, Irán

ría para la construcción de cúpulas, mediante las cuales es posible techar las edificaciones prescindiendo de vigas de madera durante la construcción. La Fig. 1.2-4 muestra el Bazar de Sirdjan en Irán cubierto con ese tipo de cúpulas y bóvedas.

En China viven aproximadamente 20 millones de personas en viviendas subterráneas, cuevas que fueron excavadas en suelo limoso.

Hallazgos de la era del bronce han demostrado que en Alemania, se utilizaba el barro como material de relleno en palizadas y entramados. El bajareque también fue utilizado en muchos países europeos. El ejemplo más antiguo de muros de tierra en Alemania se encuentra en la fortaleza de Heuneberg próxima al lago Constance y data de siglo 6 a.C (Fig. 1.2-8).

En África casi todas las mezquitas fueron construidas en tierra. La Fig. 1.2-9 muestra una del siglo 12 en Nando, y las figuras 1.2-4 y 1.2-5 posteriores de Mali y Irán.

A partir de los textos antiguos de Plinio sabemos que ya a fines del año 100 a.C. existían fortalezas de tierra apisonada en España.

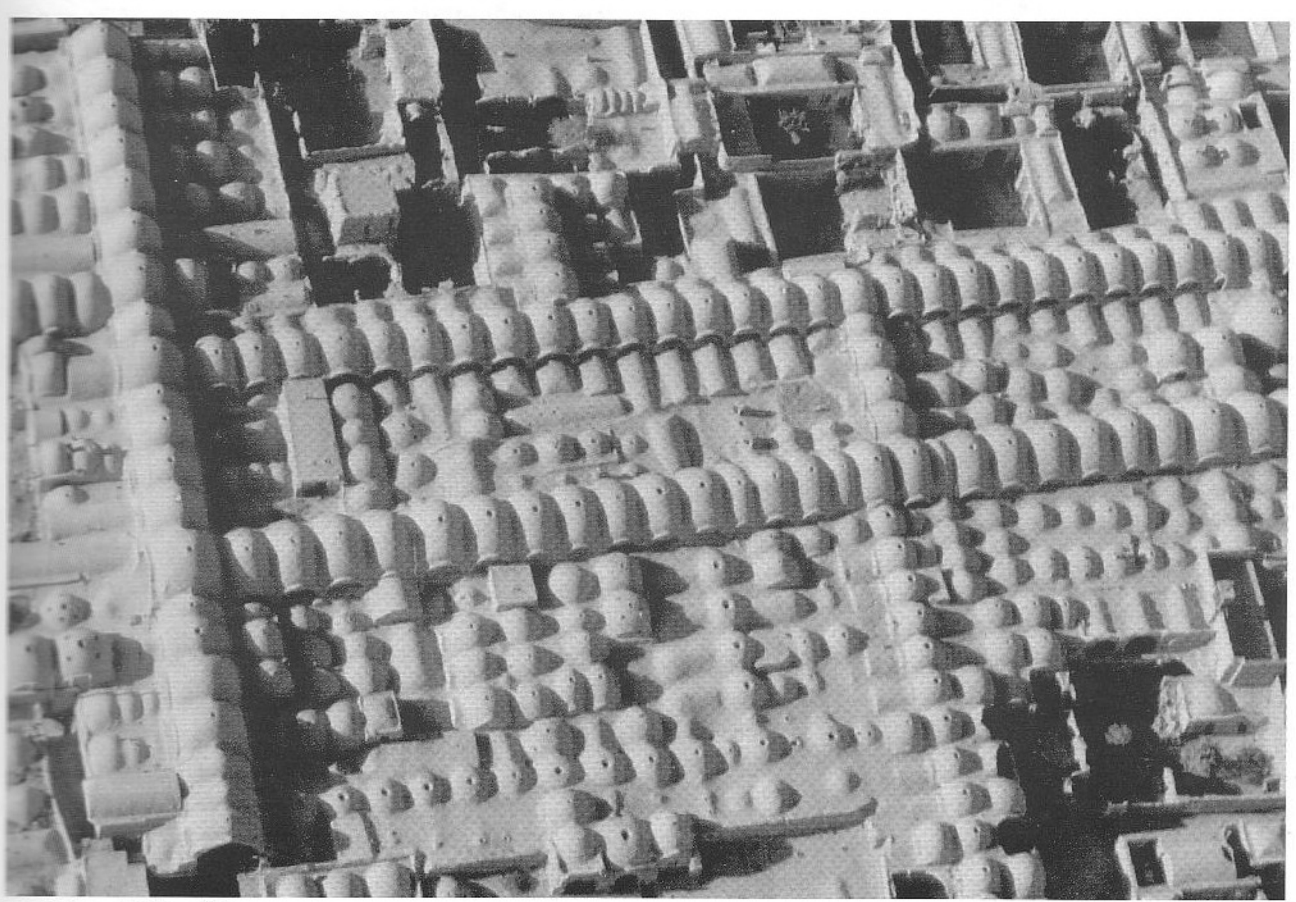
En México, Centroamérica y Sudamérica existieron construcciones de adobe en casi todas las culturas precolombinas. La técnica del tapial se conocía en algunos lugares, para otros esta fue traída por los conquistadores españoles. La Fig. 1.2-7 muestra una finca de tapial construida en el Estado de San Pablo, Brasil, que tiene una antigüedad de 250 años.

Muchas iglesias y fincas de tapial en Latinoamérica y Brasil tienen una antigüedad de aproximadamente 300 años.

En La Edad Media (siglo 13 – 17) la tierra se utilizó en toda Europa central como relleno de entramados de madera, así como para cubrir techos de paja para hacerlos resistentes al fuego.

En Francia la técnica del tapial llamada *"terre pisé"* estuvo muy extendida desde el siglo 15 al 19. Existen muchas edificaciones de más de 300 años de antigüedad, aún habitadas cerca de la ciudad de Lyon. En 1790 y 1791 François Cointeraux publicó cuatro folletos sobre esta técnica, que fueron traducidos al alemán dos años después (Cointeraux, 1793). Esta técnica se difundió en Alemania y sus alrededores debido a Cointeraux y a David Gilly que escribió el famoso libro *Handbuch der Lehmbaukunst* (Gilly, 1787) donde se describe la técnica del tapial como el método de construcción con tierra más ventajoso.

En Alemania la vivienda más antigua aún habitada con muros de tapial data de 1795 (Fig.1.2-10). El dueño de esta vivienda era el director de bomberos y proclamaba que con



1.2-6 Bazar, Sirdjan, Irán

esta técnica se podía construir una vivienda resistente al fuego de manera más económica que las viviendas construidas con entramados de madera rellenos con tierra.
La vivienda más alta de Europa con muros de barro macizo está en Weilburg, Alemania. El edificio se terminó en 1828 y aún está habitada (Fig. 1.2-11). Todos los entrepisos y el techo descansan sobre muros macizos de tierra apisonada de 75 cm de espesor en la base y 40 cm en la cima (las esfuerzos de compresión alcanzan 7,5 kg/cm² en la base). La Fig. 1.2-12 muestra las fachadas de otras casas de barro apisonado en Weilburg construidas alrededor de 1830.
Después de la primera y segunda Guerra Mundial, cuando los materiales de construcción eran escasos en Alemania, se construyeron miles de viviendas y asentamientos usando bloques de barro o tapial (Günzel 1986, p.156); (Fig. 1.2-13).

1.3 Qué debemos saber de la tierra como material de construcción

A la tierra utilizada como material de construcción se le ha dado diferentes nombres. Se denomina barro a la mezcla de arcilla, limo (arena muy fina), arena, agregados mayores como gravilla o grava. Cuando se habla de bloques de tierra arcillosa hechos a mano se emplea por lo general el termino de bloques de barro o adobe, cuando se habla de bloques comprimidos se emplea el termino bloques de suelo, cuando son extruidos en una ladrillería y no son cocidos se emplea el termino ladrillo crudo.
En comparación con materiales industrializados comunes el barro tiene tres desventajas:

1. El barro no es un material de construcción estandarizado
Su composición depende del lugar de donde se extrae puede contener diferentes cantidades y tipos de arcilla, limo, arena y agregados.
Por eso sus características pueden variar de lugar a lugar y la preparación de la mezcla correcta para una aplicación específica puede variar también. Resulta necesario saber la composición específica del barro para poder juzgar sus características y modificarlas con aditivos si fuera necesario.

2. El barro se contrae al secarse
A través de la evaporación del agua de amasado (necesaria para activar la capacidad aglomerante de la arcilla y para poder ser manipulado) pueden aparecer fisuras. La retracción lineal durante el secado oscila entre 3-12% en técnicas de tierra húmeda (como las que se usan para morteros y bloques de barro) y entre 0,4-2% en técnicas con mezclas secas (utilizadas para tapial, o bloques compactados). La retracción se puede disminuir reduciendo la cantidad de agua y arcilla, optimizando la composición granulométrica o mediante el empleo de aditivos. (Ver sección 4.2).



1.2-7 Finca de tapial, San Pablo, Brasil

3. El barro no es impermeable
El barro debe ser protegido contra la lluvia y las heladas especialmente en estado húmedo.
Las paredes de tierra pueden protegerse con aleros, barreras impermeabilizantes, tratamientos de superficies etc. (Ver sección 4.3 y 12).
Por otra parte el barro tiene muchas ventajas en comparación con los materiales de construcción industriales.

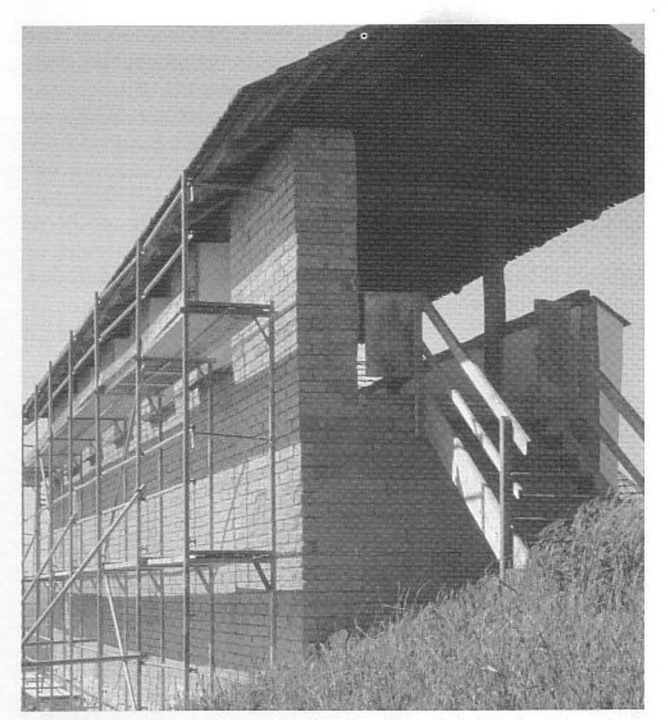
1. El barro regula la humedad ambiental
El barro tiene la capacidad de absorber y desorber humedad más rápido y en mayor cantidad que los demás materiales de construcción. Por eso regula el clima interior. Experimentos llevados a cabo en el «Forschungslabor für Experimentelles Bauen» (FEB) (Laboratorio de Construcciones Experimentales) de la Universidad de Kassel, Alemania, demostraron que cuando la humedad relativa en un ambiente interior aumenta súbitamente de 50% a 80%, los bloques de barro pueden absorber 30 veces más humedad que los ladrillos cocidos en un lapso de dos días. Aún cuando se colocan en una cámara climática a 95% de humedad relativa durante 6 meses los adobes se humedecen pero no se ablandan. Mediciones hechas durante un lapso de 8 años en una vivienda recientemente construida en Alemania donde todos los muros interiores y exteriores son de tierra, mostraron que la humedad relativa en esa vivienda es de 50% durante todo el año. Esta fluctúa solamente entre 5 y 10% ofreciendo así condiciones de vida saludables. (Para más detalles ver sección 1.4).

2. El barro almacena calor
Al igual que otros materiales densos, el barro almacena calor. En zonas climáticas donde las diferencias de temperaturas son amplias, o donde es necesario almacenar la ganancia térmica por vías pasivas, el barro puede balancear el clima interior.

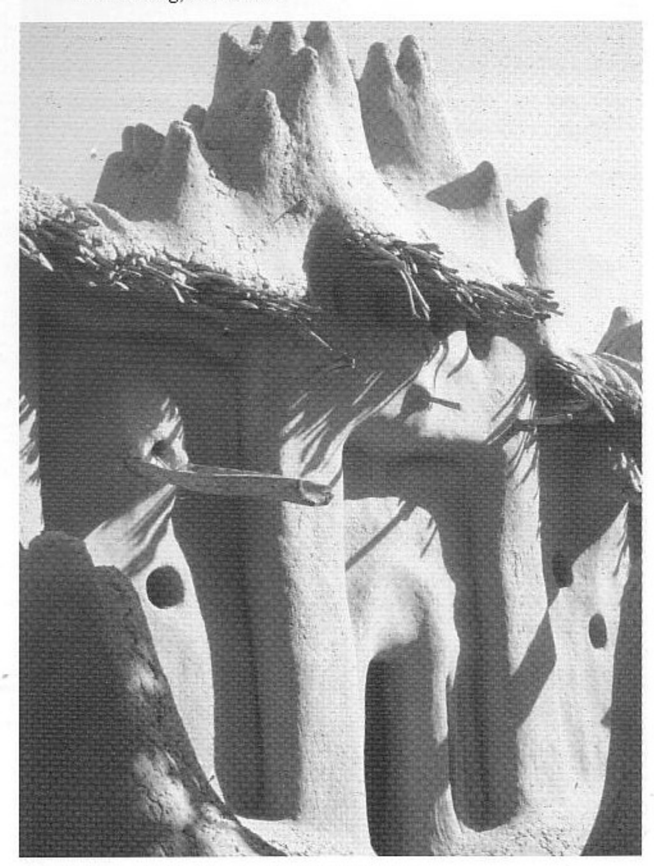
3. El barro ahorra energía y disminuye la contaminación ambiental
El barro prácticamente no produce contaminación ambiental en relación a los otros materiales de uso frecuente, para preparar, transportar y trabajar el barro en el sitio se necesita solo 1% de la energía requerida para la preparación, transporte y elaboración de hormigón armado o ladrillos cocidos.

4. El barro es reutilizable
El barro crudo se puede volver a utilizar ilimitadamente. Solo necesita ser triturado y humedecido con agua para ser reutilizado. El barro en comparación con otros materiales no será nunca un escombro que contamine el medio ambiente.

5. El barro economiza materiales de construcción y costos de transporte
Generalmente el barro que se encuentra en la mayoría de las obras producto de la excavación de cimientos puede ser utilizado para la construcción. Si este no contiene suficiente arcilla, esta será añadida y si contiene mucha arcilla deberá mezclarse con arena lo que significa modificar la com-



1.2-8 Reconstrucción de un mucho de adobe del siglo 6 a.D., Heuneburg, Alemania



1.2-9 Mesquita de Nando del siglo 12, Mali

posición del barro. En comparación con otros materiales de construcción se pueden disminuir considerablemente los costos si se utiliza el suelo excavado. Aún cuando este deba ser transportado de otros lugares resulta usualmente más económico que los materiales industriales.

6. El barro es apropiado para la autoconstrucción
Las técnicas de construcción con tierra pueden ser ejecutadas por personas no especializadas en construcción, es suficiente la presencia de una persona experimentada controlando el proceso de construcción. Estas técnicas de construcción son ideales para trabajos de auto construcción porque se pueden ejecutar con herramientas sencillas y económicas, pero al mismo tiempo estas técnicas son más trabajosas en su ejecución.

7. El barro preserva la madera y otros materiales orgánicos
El barro mantiene secos los elementos de madera y los preserva cuando están en directo contacto con él, debido a su bajo equilibrio de humedad de 0.4 a 6% en peso y a su alta capilaridad.
Los insectos y hongos no pueden destruir la madera en esas condiciones ya que los insectos necesitan un mínimo de hu-







Izquierda:
1.2-10 Casa de tapial, Meldorf, Alemania, 1795
1.2-11 Casa de tapial, Weilburg, Alemania, 1828
Derecha:
1.2-12 Casa de Tapial, Weilburg, Alemania, ca. 1830
1.2-13 Asentamiento Lübeck-Schlutup, Alemania



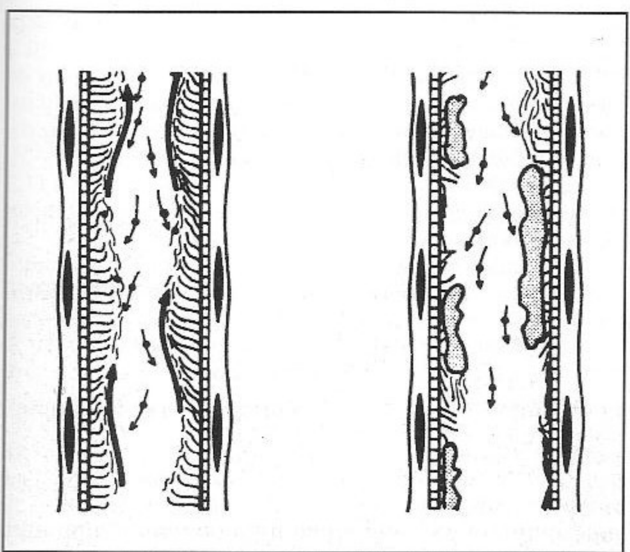
medad de 14 a 18% y los hongos más de 20% de humedad para vivir (Möhler 1978, p.18). Así mismo, el barro puede preservar pequeñas cantidades de paja dentro de su masa. Sin embargo si se utiliza barro alivianado con paja con una densidad menor de 500 – 600 kg/m^3 esta capacidad de preservación del barro no resultará suficiente debido a la alta capilaridad de la paja cuando se utiliza en esas proporciones. En esos casos se debe tener en cuenta que está latente la posibilidad de su descomposición por la putrefacción provocada por una prolongada exposición a la humedad. (Ver sección 10.3).

8. El barro absorbe contaminantes
Se ha dicho muchas veces que el barro contribuye a purificar el aire de un ambiente interior pero hasta el momento esto no ha sido científicamente comprobado. Es una realidad que el barro puede absorber contaminantes disueltos en agua. Por ejemplo existe una planta de demostración en Berlin-Ruhleben que remueve fosfatos de 600m^3 de aguas residuales diariamente usando suelos arcillosos. Los fosfatos se pegan a los minerales de la arcilla y son extraídos de los residuos. La ventaja de este procedimiento es que no quedan substancias ajenas en el agua ya que el fosfato se convierte en fosfato de calcio y se puede reutilizar como fertilizante.

1.4 Mejoramiento del clima interior

1.4.1 Generalidades

En ciudades con climas templados y fríos las personas pasan el 90% de su tiempo en edificios cerrados. Resultando el clima interior muy importante para su bienestar. Su confort depende de la temperatura del espacio interior, de la temperatura del espacio circundante, del movimiento del aire interior, del contenido de humedad del aire y de la contaminación del aire.

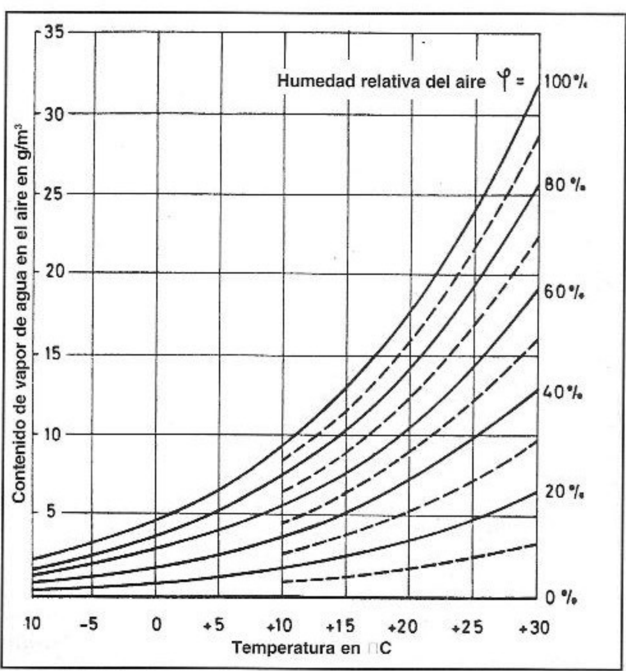


1.4-1 Corte de una traquea con membrana mucosa del epiltelio normal (izquierda) y una reseca (derecha)

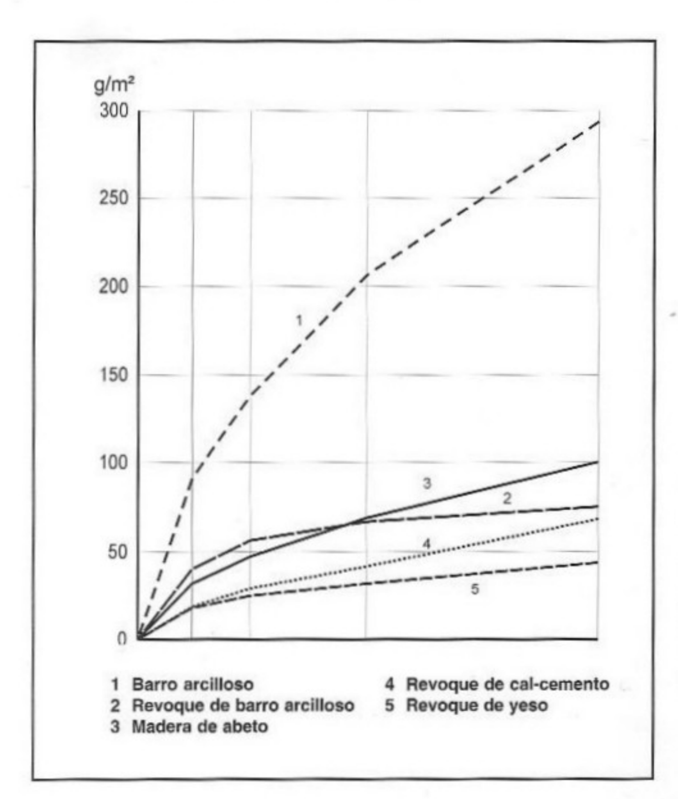
Si la temperatura es muy alta o muy baja los habitantes lo perciben, pero la influencia dañina de una humedad muy alta o muy baja no es de conocimiento común. La humedad del aire en los interiores ejerce una influencia significativa en el bienestar de los habitantes y la tierra tiene la capacidad de balancear la humedad del aire como ningún otro material. Este aspecto de reciente investigación se describe en detalle en la siguiente sección.

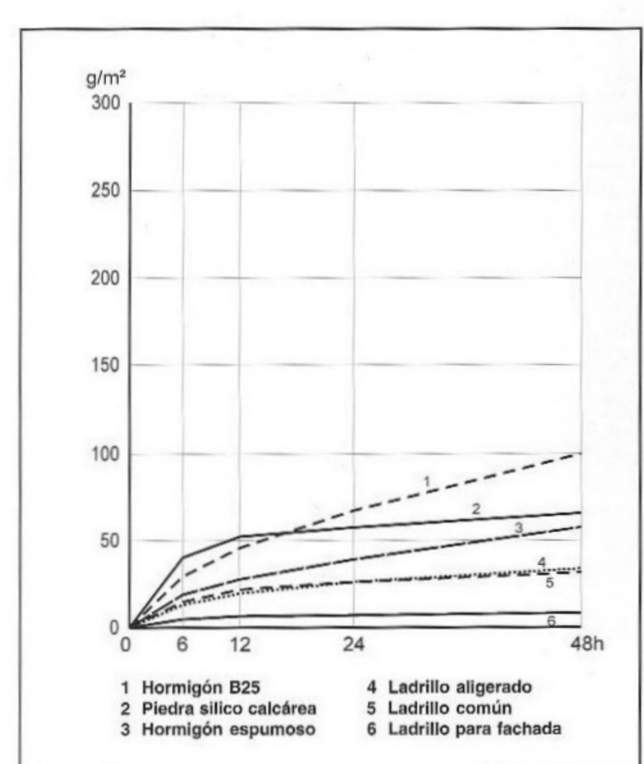
1.4.2 Humedad del aire y salud

De las investigaciones de Grandjean (1972) y Becker (1986) sabemos que una humedad relativa menor de 40% durante un largo período puede resecar las mucosas. Lo que conlleva a una disminución de la resistencia a los resfríos y a enfermedades relacionadas. Esto se debe a que normalmente las mucosas del epitelio de la tráquea absorben polvo, bacterias, virus etc. y los restituyen a la boca mediante el movimiento ondulatorio de los vellos del epitelio. Si este sistema de absorción y transporte se interrumpe por resecamiento, estos cuerpos ajenos alcanzan los pulmones provocando enfermedades. (ver Fig. 1.4-1.)
Una humedad relativa de 50 a 70% tiene muchas influencias positivas: reduce el contenido de polvo fino en el aire, activa los mecanismos de protección de la piel contra los microbios, disminuye la vida de muchas bacterias y virus y disminuye los olores y la electricidad estática en las superficies de objetos.
Una humedad relativa de más del 70% resulta en la mayoría de los casos desagradable debido a la disminución en la absorción de oxígeno de la sangre en condiciones cálido húmedas. Se observan incrementos de las dolencias reumáticas en ambientes fríos y húmedos. El crecimien-



1.4-2 Diagrama de Carrier. Contenido de agua en el aire en relación con la temperatura





1.4-3 Curvas de absorción en relación al tiempo, de muestras de diferentes materiales de 1,5cm de espesor, a una temperatura de 21 °C con un incremento súbito de la humedad del ambiente de 50% a 80%

to de hongos en espacios cerrados se incrementa cuando la humedad alcanza más de 70 o 80%. Las esporas de hongos en grandes cantidades pueden conllevar a diferentes enfermedades y alergias. A partir de estas consideraciones, se puede establecer que el contenido de humedad en un ambiente interior no debe ser menor a 40% ni mayor a 70%.

1.4.3 Influencia del intercambio de aire en la humedad del aire

En climas templados y fríos cuando la temperatura exterior es mucho menor que la interior, el interior se vuelve seco como resultado del intercambio de aire fresco y puede afectar nuestra salud. Por ejemplo si un aire exterior con una temperatura de 0°C y 60% de humedad relativa entra en un espacio y se calienta hasta 20°C su humedad relativa disminuye a menos de 20%. Aún si el aire exterior a una temperatura 0°C tuviera 100% de humedad y se calienta a 20°C su humedad relativa disminuirá a menos de 30%. En ambos casos resulta necesario aumentar la humedad para alcanzar condiciones saludables. Esto se puede lograr con la desorción de humedad de los muros, pisos, entrepisos y muebles. (Ver Fig. 1.4-2).

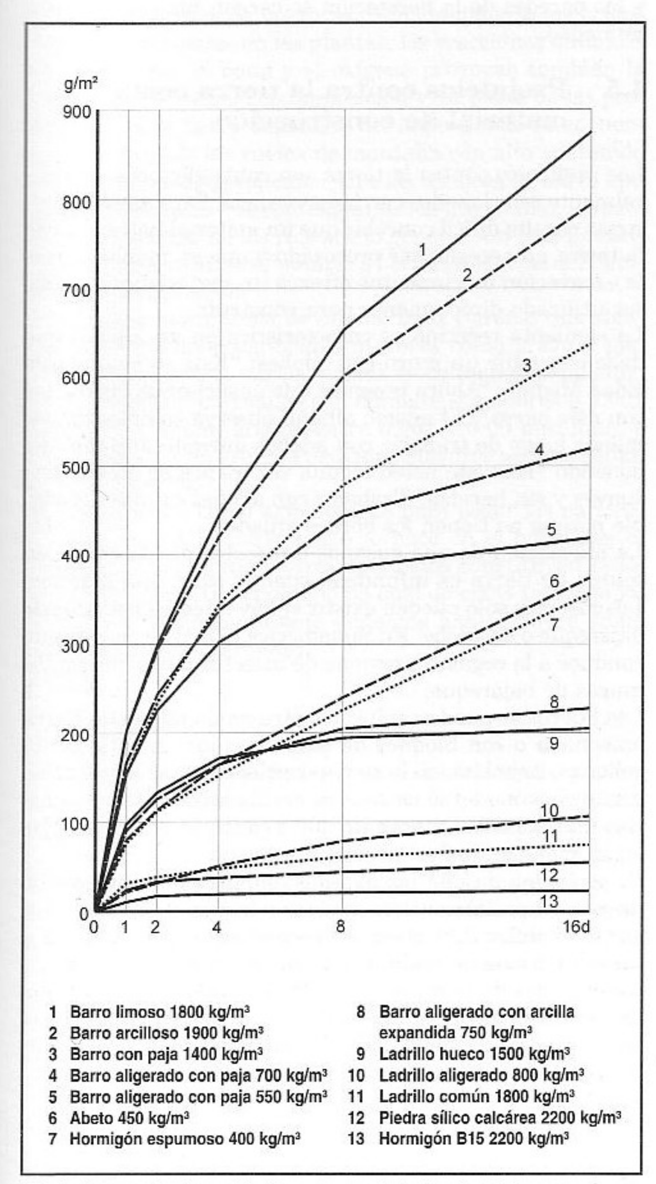
1.4.4 El efecto del barro en el balance de la humedad

Un material poroso tiene la capacidad de absorber humedad del ambiente y desorberla, ofreciendo un balance de humedad en el ambiente interior. El contenido de humedad del material depende de la temperatura y de la humedad del ambiente (ver sección 2.4.3 y Fig. 2.4-3). La efectividad de este proceso de balance depende también del la velocidad de la absorción y la desorción. Por ejemplo, experimentos desarrollados por el FEB muestran que la primera capa de 1,5 cm de un muro de bloques de barro (adobe) es capaz de absorber aproximadamente 300 g de agua por m² de la superficie del muro en 48 horas si la humedad del ambiente incrementa súbitamente de 50 a 80%. En cambio, la piedra sílicocalcárea y la madera de pino de un mismo espesor absorben solamente 100 g/m² aproximadamente, el revoque 26-76 g/m² y el ladrillo cocido solo 6-30 g/m² en el mismo período. (Ver Fig. 1.4-3). Las curvas de absorción por ambas caras de muros de 11,5 cm de espesor, de diferentes materiales sin revoque por un lapso de 16 días se muestran en la Fig. 1.4-4.
Los resultados demuestran que los bloques de barro (adobes) absorben 50 veces más humedad que los ladrillos cocidos a altas temperaturas. Los datos de absorción de muestras de 1.5 cm de espesor con un incremento súbito de la humedad del aire de 30 a 70% se muestran en la Fig. 1.4-5. La influencia del espesor de las capas de barro en relación a la absorción se muestra en la Fig. 1.4-6. Aquí vemos que cuando la humedad incrementa súbitamente de 50% a 80% solo los 2 cm exteriores absorben la humedad en las primeras 24 horas y en los 4 primeros días solo la capa exterior de 4 cm es activa. Pinturas de cal, caseína y cola celulosa reducen esta absorción ligeramente mientras que con pinturas de doble látex y aceite de linaza se

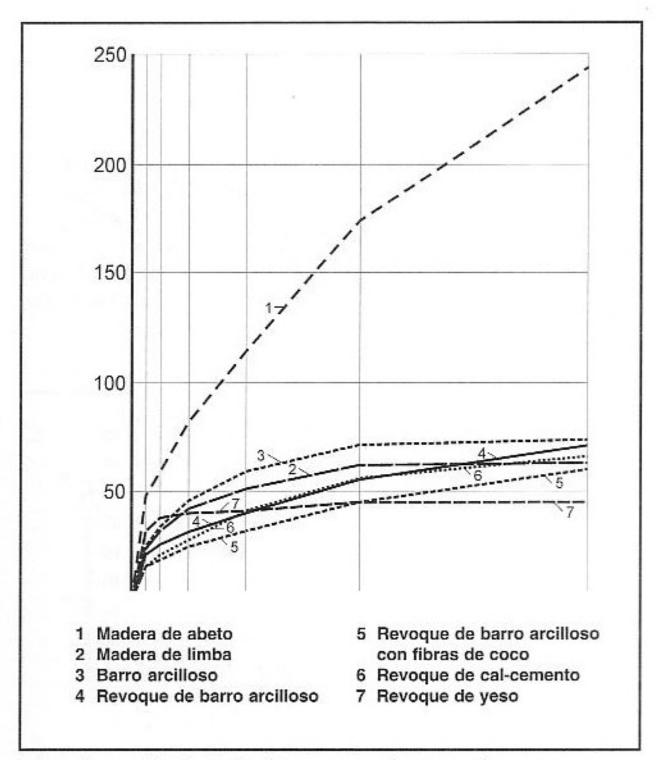
puede obtener un efecto de reducción de la absorción en un 38% y 50% respectivamente como, se muestra en la Fig.1.4-7.

En una habitación con un área de 3x4 m, una altura de 3m y una superficie en muros de 30m² (sin contar los vanos de puertas y ventanas), si incrementa la humedad del aire interior de 50 a 80%, el muro de bloques de barro sin revoque absorbe aproximadamente 9 litros de agua en 48 horas. (Si la humedad disminuye del 80% a 50% la misma cantidad es desorbida).

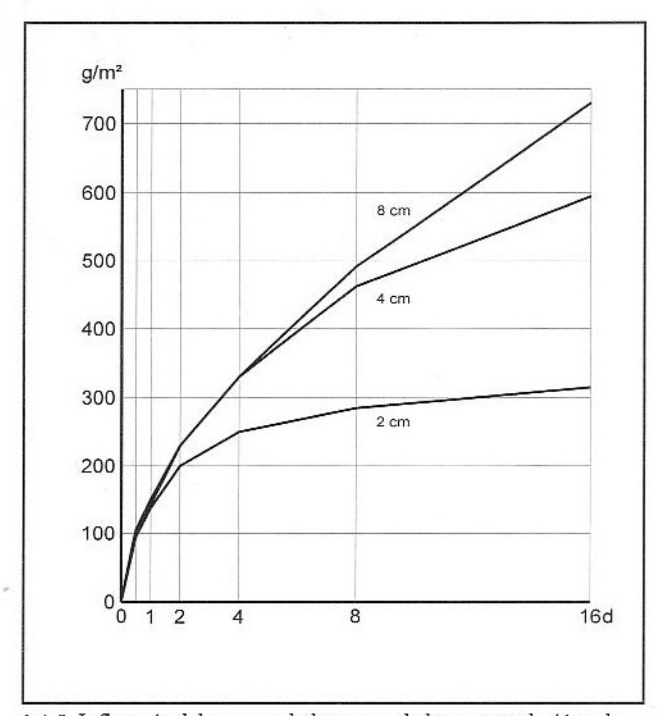
Los mismos muros construidos con ladrillos cocidos absorberían solamente 0.9 litros de agua en el mismo lapso de



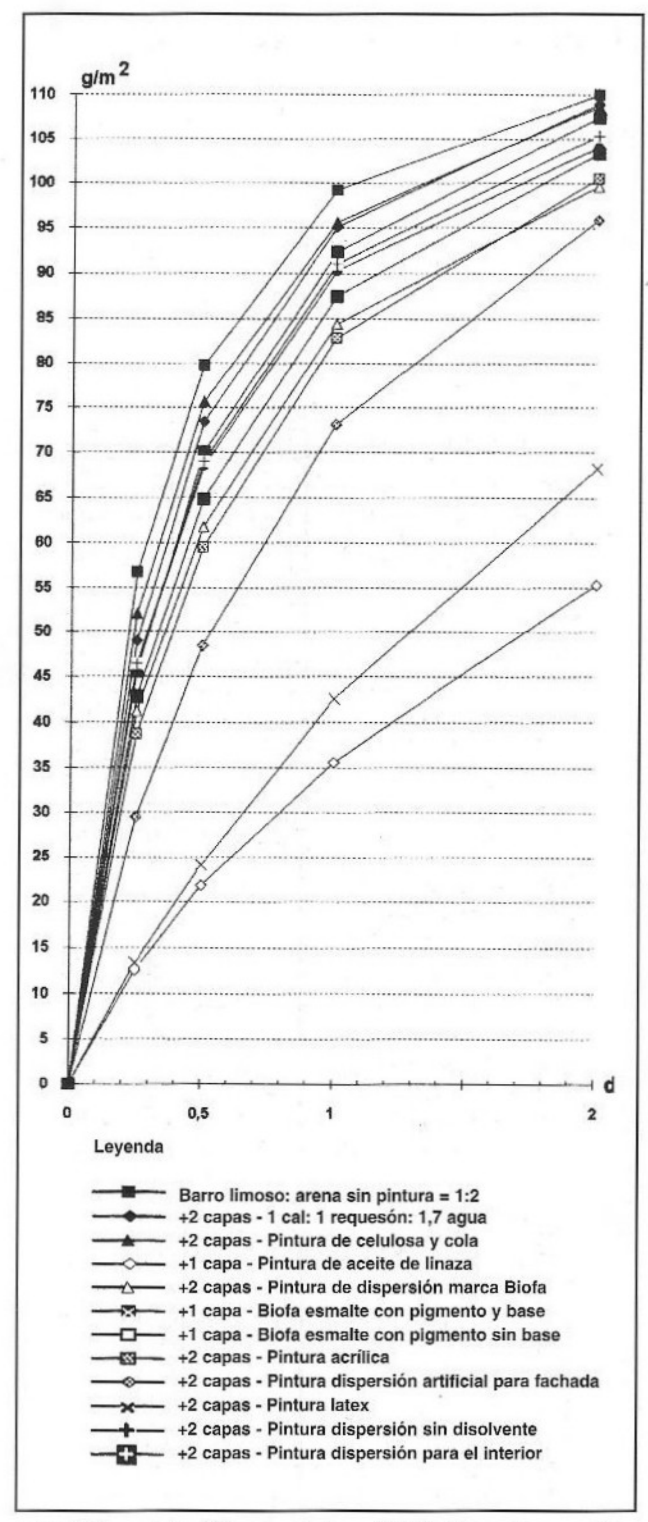
1.4-4 Curvas de absorción de un muro interior de 11.5 cm con ambas caras expuestas a una temperatura de 21°C luego de un incremento súbito de la humedad del aire de 50% a 80%



1.4-5 Curvas de absorción de muestras de 1,5 cm de espesor con una cara expuesta a una temperatura de 21°C luego de un incremento súbito de la humedad del ambiente de 30% a 70%



1.4-6 Influencia del espesor de las capas de barro en relación a la absorción de humedad, a una temperatura de 21°C y luego de un incremento súbito de la humedad del ambiente de 50% a 80%



1.4-7 Influencia de diferentes pinturas (100 ± 10mm de espesor) en relación a la absorción, aplicadas sobre revoques de 1,5 cm. de espesor, después de un incremento súbito en la humedad del ambiente de 50 a 60 % a una temperatura de 21°C

tiempo, lo que significa que no son apropiados para balancear la humedad de los ambientes.

Mediciones realizadas durante un lapso de cinco años en diferentes ambientes de una vivienda construida en 1985 en Alemania, donde los muros exteriores e interiores están construidos con tierra mostraron que la humedad relativa se mantiene constante durante el año variando de 45 a 55%. El dueño quería una humedad mayor de 50-60% solo en el dormitorio y fue posible mantener este nivel (que es más sano para personas propensas a los resfríos) utilizando la mayor humedad del baño para liberarla en la habitación adyacente. Si la humedad en el dormitorio disminuye se abre la puerta del baño luego de tomar una ducha y las paredes de la habitación se cargan nuevamente con humedad.

1.5 Prejuicios contra la tierra como material de construcción

Los prejuicios contra la tierra son contradictorios y generalmente relacionados con la ignorancia. Para muchas personas resulta difícil concebir que un material natural como la tierra no necesite ser procesado y que en muchos casos la excavación de cimientos ofrezca un material que puede ser utilizado directamente para construir.

La siguiente reacción es característica en un albañil que debe construir un muro con adobes: “Esto es como en la Edad Media”; “Ahora tenemos que ensuciarnos las manos con este barro”. El mismo albañil observa complacido sus manos luego de trabajar con adobes durante una semana diciendo “Ha visto usted alguna vez manos de albañil tan suaves y sin heridas? Trabajar con adobes es mas agradable porque no tienen los bordes afilados”

La afirmación de que gusanos o insectos puedan vivir en muros de tierra es infundada cuando estos son macizos. Los insectos solo pueden existir si hay huecos en muros de bajareque o de adobe. En Sudamérica el mal de chagas que conduce a la ceguera proviene de insectos que viven en los muros de bajareque.

Los huecos se pueden evitar construyendo muros de tierra apisonada o con bloques de barro con juntas totalmente rellenas. Asimismo si la tierra contiene demasiado aditivo orgánico como en el caso de la arcilla alivianada con paja con una densidad menor de 600 kg/cm^3, se pueden alojar en su masa pequeños insectos y atacarla.

El problema de que las paredes de barro son difíciles de limpiar (especialmente en cocinas y baños) se puede resolver si se pintan con caseína, cal-caseína, aceite de linaza u otras pinturas de manera que no sean abrasivas. Baños con paredes de barro son usualmente más higiénicos que los revestidos con azulejos, debido a que las paredes de barro absorben rápidamente la humedad e inhiben el crecimiento de hongos como se explicó en la sección 14.9.

2. Propiedades de la tierra como material de construcción

2.1 Composición

2.1.1 Generalidades

La tierra es producto de la erosión de las rocas en la corteza terrestre. La erosión ocurre fundamentalmente a través de la pulverización de las rocas provocada por movimientos glaciales, del agua y el viento, por la expansión y la contracción térmica de las rocas o por la expansión del agua congelada en las grietas de las rocas. Adicionalmente los ácidos orgánicos existentes en las plantas, las reacciones químicas producidas por el agua y el oxígeno provocan también la erosión de las rocas. La composición y variedad de las propiedades de la tierra dependen del lugar donde se encuentra. Por ejemplo los suelos de montaña con alto contenido de grava son más apropiados para las técnicas de barro apisonado (previendo que contengan suficiente arcilla), los suelos en las laderas de los ríos por lo general son más limosos y por lo tanto menos resistentes a las inclemencias del tiempo y a la compresión.

La tierra es una mezcla de arcilla, limo y arena, que algunas veces contiene agregados mayores como grava y piedras. En Ingeniería sus partículas se definen dependiendo de su diámetro: partículas con diámetros menores a 0.002 mm se denominan arcilla, entre 0,002 y 0.06 mm limo, y entre 0.06 y 2 mm arena. Partículas mayores se denominan gravas y piedras.

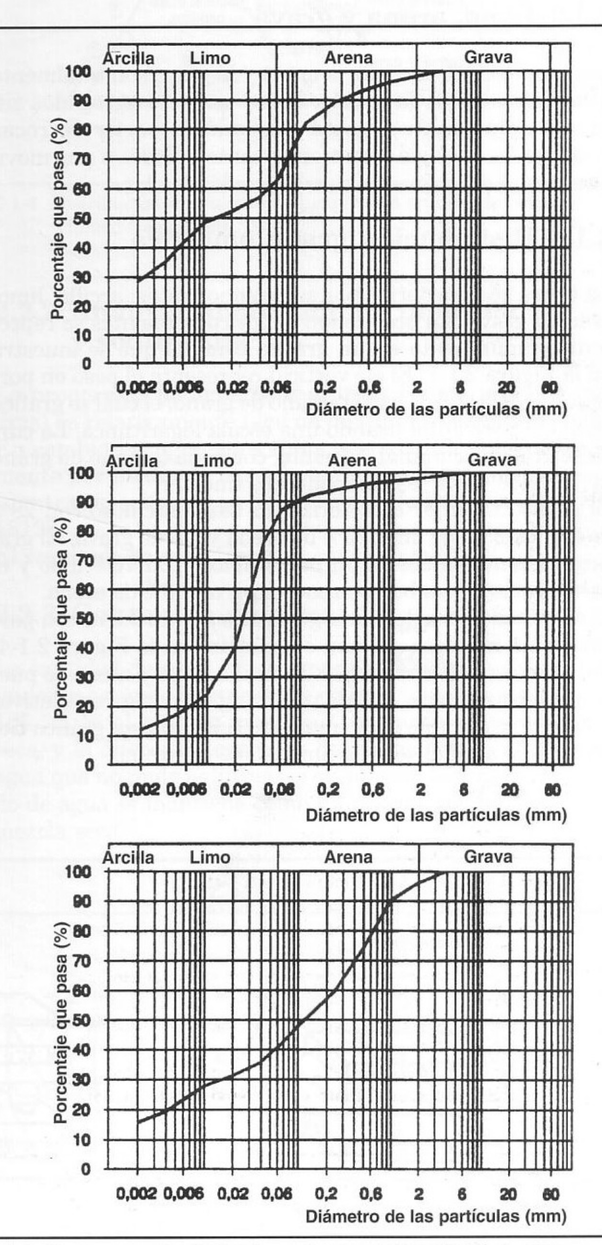
La arcilla actúa como aglomerante para pegar las partículas mayores en la tierra como lo hace en el hormigón el cemento. Limo, arena y otros agregados constituyen rellenos en la tierra. Dependiendo de cual de estos tres componentes sea el predominante podemos hablar de un suelo arcilloso, limoso o arenoso.

2.1.2 Arcilla

La arcilla es producto de la erosión del feldespato y otros minerales. El feldespato contiene oxido de aluminio, un segundo oxido metálico y bióxido de silicio. Uno de los más comunes tipos de feldespato tiene la formula química $Al_2O_3 \cdot K_2O \cdot 6SiO_2$. Si durante la erosión, los componentes del potasio se disuelven, entonces una arcilla denominada caolinita es formada y tiene la formula $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$. Otro mineral arcilloso muy común es la montmorilonita con la fórmula $Al_2O_2 \cdot 4SiO_2$. Adicionalmente existe una amplia variedad de minerales arcillosos como la ilita que no se encuentran comúnmente. La estructura de esos minerales se muestra en la Figura 2.1-2.

Los minerales arcillosos se encuentran también mezclados con otros componentes químicos, particularmente con óxido de hierro hidratado ($Fe_2O_3 \cdot H_2O$) y otros componentes de hierro dándole a la arcilla un color característico amarillo o rojo. El manganeso da un color marrón, la cal y el magnesio blanco mientras que las substancias orgánicas dan un color marrón oscuro o negro.

Los minerales arcillosos tienen usualmente una estructura laminar hexagonal y cristalina. Estas láminas están constituidas por diferentes capas que usualmente se forman alrededor de un núcleo de silicio o aluminio. En el caso del silicio estas están rodeadas de átomos de oxígeno; y en el caso del aluminio por grupos de hidróxidos (OH). Las capas de óxido de silicio tienen la carga negativa más fuerte



2.1-1 Curva granulométrica de un barro arcilloso (arriba), uno limoso (centro) y uno arenoso (abajo)

lo que conlleva a una alta cohesividad ínterlaminar. (ver Fig. 2.1-3).
La caolinita está constituida por dos láminas y posee una capacidad aglutinante baja debido a que cada capa de hidróxido de aluminio está conectada a un capa de óxido de silicio, en cambio en el mineral montmorilonita constituido por tres láminas, una capa de hidróxido de aluminio está siempre entre dos capas de óxido de silicio, desplegando así una capacidad aglutinante alta. La mayoría de los minerales de arcilla tienen cationes intercambiables. La capacidad aglutinante y la resistencia a la compresión de la tierra dependen del tipo y cantidad de cationes.

2.1.3 Limo, arena y grava

Las propiedades del limo, la arena y la grava son totalmente distintas a las de la arcilla. Estos son solo agregados sin fuerza aglutinante y están formadas a partir de rocas erosionadas en cuyo caso tienen cantos filosos o por movimiento del agua en este caso son redondeadas.

2.1.4 Distribución granulométrica

La tierra se caracteriza por sus componentes: arcilla, limo, arena y grava. La proporción de los componentes se representa comúnmente en un gráfico como el que se muestra en la Figura 2.1-1. El eje vertical representa el peso en porcentajes del total de cada tamaño de grano, el cuál se grafica en el eje horizontal usando una escala logarítmica. La curva se grafica acumulativamente, con cada tamaño de grano incluyendo todos los componentes finos.
El gráfico superior caracteriza un barro arcilloso con 28% de arcilla, 35% de limo, 33% de arena y 4% de grava. El gráfico del centro muestra un barro limoso con 76% limo y el gráfico inferior un barro arenoso con un 56% de arena.
Otro método para describir gráficamente un barro con partículas no mayores a 2 mm se muestra en la Figura 2.1-4. En este caso los porcentajes de arcilla, limo y arena se pueden graficar en tres ejes de un triángulo y leer correlativamente. Por ejemplo suelo marcado S III en este gráfico tiene 22% de arcilla, 48% de limo y 30% de arena.

2.1.5 Componentes orgánicos

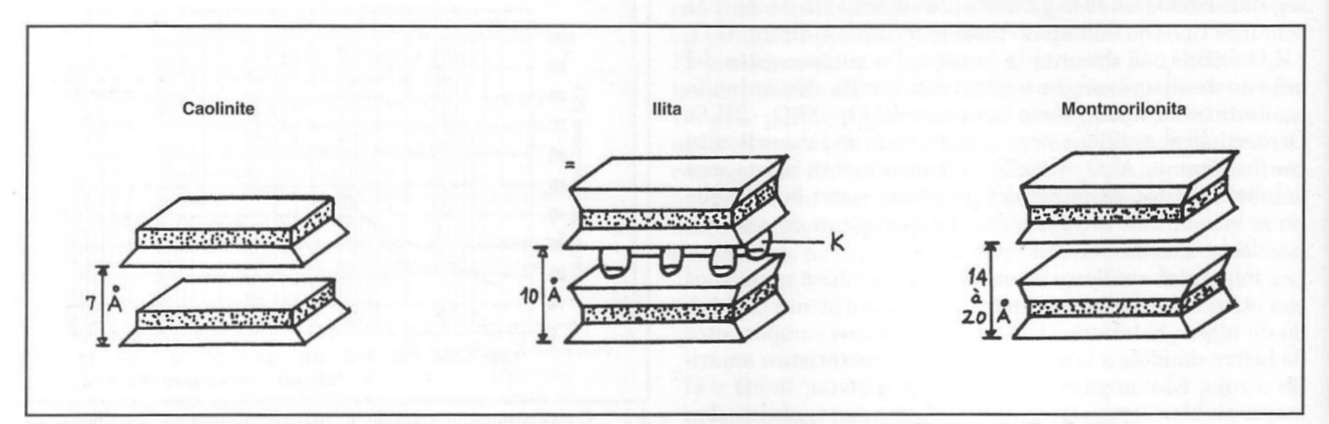
Un suelo extraído de una profundidad menor a 40 cm contiene por lo general materia orgánica y humus (producto de la descomposición de plantas) el mismo está constituido fundamentalmente por partículas coloidales y es ácido (pH<6). La tierra como material de construcción debería estar libre de materia orgánica y humus. En algunas condiciones fibras vegetales como paja pueden añadirse asegurándose de que estén secas, evitando así los riesgos por su descomposición (ver sección 10.3).

2.1.6 Agua

El agua activa las fuerzas aglutinantes del barro. Aparte del agua libre, existen tres tipos diferentes de agua en el barro: agua de la cristalización (agua estructural), agua absorbida y agua capilar (agua de poros). El agua de cristalización está químicamente enlazada y se puede distinguir solo si el barro es calentado desde 400 °C a 900 °C. El agua de absorción está eléctricamente enlazada a los minerales de la arcilla. El agua capilar es agua que entra en los poros del material por acción capilar. El agua absorbida y la capilar se desprenden del material cuando se calienta la mezcla a 105 °C. Si se humedece arcilla seca, esta se expande ya que el agua se desliza entre las estructuras laminares, recubriendo las laminas con una fina película de agua. Si esta agua se evapora la distancia ínterlaminar se reduce y las láminas se acomodan paralelamente debido a sus fuerzas de atracción eléctricas. Así, la arcilla obtiene una fuerza aglutinante (ver sección 2.6.1), si está en estado plástico y obtiene resistencia a la compresión luego del secado.

2.1.7 Porosidad

El grado de porosidad se define por el volumen de todos los poros del barro. Más importante que el volumen de los poros son las dimensiones de los mismos. Mientras mayor la porosidad mayor la difusión de vapor y mayor la resistencia a las heladas.



2.1-2 Estructura de los tres minerales arcillosos más comunes y su distancia intralaminar (según Houben, Guillaud, 1984)

2.1.8 Superficie específica

La superficie específica de un suelo es la suma de superficies de todas las partículas. La arena gruesa tiene una superficie específica de aproximadamente 23 cm²/g, el limo aproximadamente 450 cm²/g y la arcilla desde 10 m²/g (caolinita) hasta 1000 m²/g (montmorillonita). Mientras mayor sea la superficie específica de la arcilla mayor serán las fuerzas internas de adhesión que resultan importantes para la capacidad aglutinante y la resistencia a la compresión y tensión.

2.1.9 Densidad

La densidad se define por la relación de la masa seca con respecto al volumen (incluyendo los poros). Un suelo recientemente excavado tiene una densidad de 1200 a 1500 kg/m³. Si este suelo se compacta como en técnicas de tapial o en bloques de suelo, su densidad varia de 1700 a 2200 kg/m³ (o más, si contiene considerables cantidades de grava o agregados gruesos)

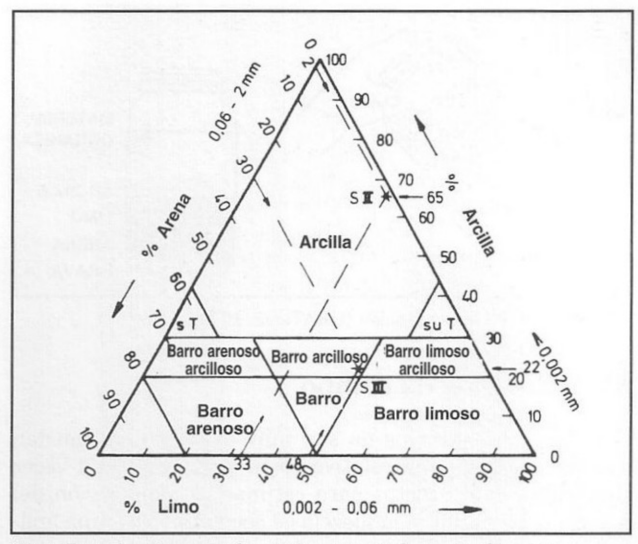
2.1.10 Compactibilidad

La compactibilidad es la capacidad de la tierra para ser compactada mediante presión estática o compactación dinámica reduciendo así su volumen. Para obtener la compactación máxima el suelo debe tener una contenido específico de agua lo que se denomina "contenido óptimo de agua" lo que permite llevar a las partículas a una con estado más denso. Esto se mide con el ensayo Proctor (ver sección 4.5.4)

2.2 Ensayos para analizar la composición de la tierra

2.2.1 Generalidades

Para verificar que un suelo es apropiado para una aplicación específica, es necesario conocer su composición. La sección siguiente describe ensayos estandarizados de laboratorio y ensayos de campo simples que son utilizados para analizar la composición de un suelo.



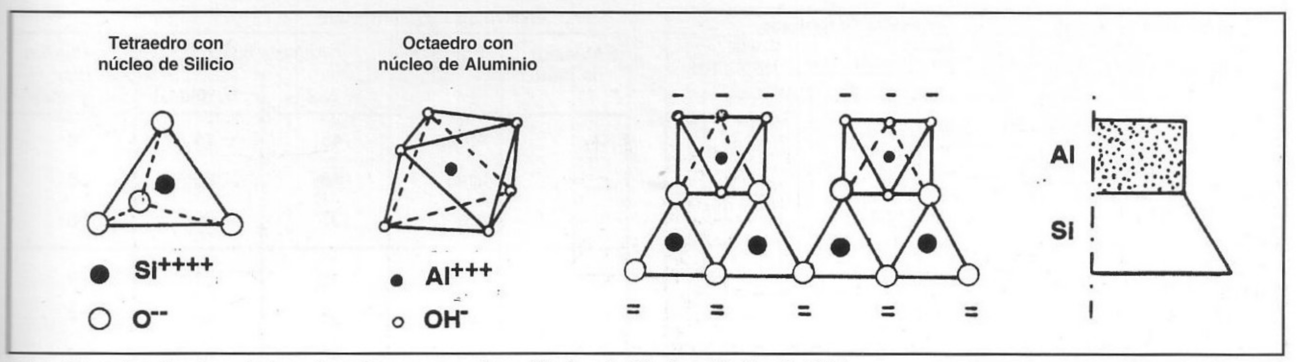
2.1-4 Distribución granulométrica expresada en un diagrama trilineal (según Voth 1978)

2.2.2 Análisis combinado de tamizado y sedimentación

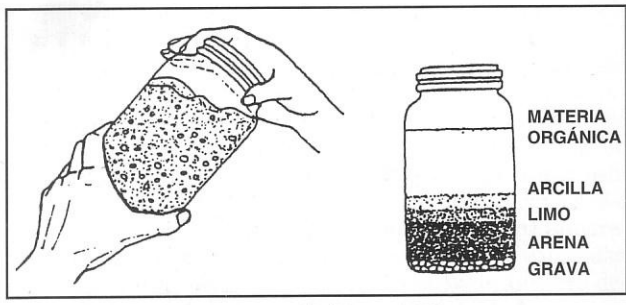
La proporción de agregados gruesos (arena, grava y piedras) es relativamente fácil de distinguir con el tamizado. En cambio los agregados finos pueden diferenciarse solamente por medio de la sedimentación. Este ensayo se encuentra especificado en detalle en la Norma Alemana DIN 18123.
El resultado se muestra en la curva de la Fig. 2.1-1

2.2.3 Contenido de agua

La cantidad de agua en una mezcla de tierra puede determinarse pesando la muestra y calentándola después, hasta 105 °C. Si el peso se mantiene constante, la mezcla está seca, y la diferencia entre los dos pesos nos da el peso del agua que no pudo aglutinarse químicamente. Este contenido de agua se mantiene como un porcentaje del peso de la mezcla seca.



2.1-3 Estructura laminar de los minerales comunes de arcilla (según Houben, Guillaud, 1984)



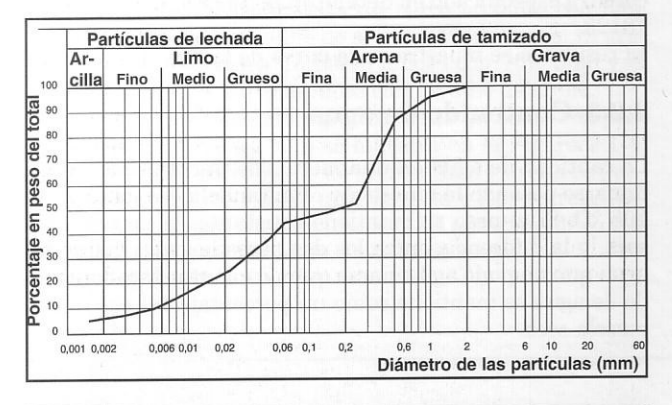
2.2-1 Ensayo de sedimentación (CRATerre. 1979)

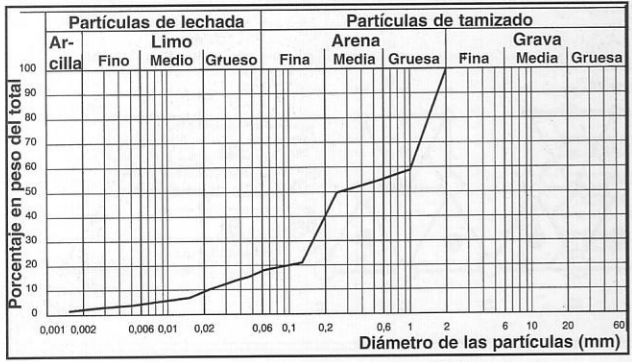
2.2.4 Ensayos de campo

Los siguientes ensayos no son muy exactos pero pueden hacerse en el sitio en relativo corto tiempo y son a veces suficientemente exactos para estimar la composición del barro y determinar si la mezcla es aceptable para una aplicación específica.

Ensayo del olor
El barro puro es inodoro, pero tiene olor a moho si contiene humus o materia orgánica en descomposición.

Ensayo de la mordedura
Una muestra de barro húmedo se muerde levemente. Los barros arenosos producen una sensación desagradable. Los barros arcillosos por otra parte dan una sensación pegajosa, suave, o harinosa.





2.2-2 Distribución granulométrica de pruebas de barro

Ensayo de lavado
Una muestra de barro húmedo se frota entre las manos. Si las partículas se sienten claramente, esto indica que el barro es arenoso o gravoso, mientras que si la muestra es pegajosa pero las manos pueden limpiarse al frotarlas cuando se secan, esto es indicativo de un barro limoso. Si la muestra es pegajosa, haciendo necesario el uso de agua para lavarlas esto indica que el barro es arcilloso.

Ensayo del corte
Una muestra húmeda de barro se moldea en forma de bola y se corta con un cuchillo. Si la superficie cortada es brillosa significa que la mezcla tiene un alto contenido de arcilla, si la superficie es opaca indica un alto contenido de limo.

Ensayo de sedimentación
Se agita una muestra de barro con agua en un frasco. Las partículas mayores se asientan primero en el fondo y las más finas arriba. A partir de esta estratificación se puede estimar la proporción de los componentes. Es una interpretación errónea asumir que la medida de cada capa corresponde a la proporción de arcilla, limo, arena y grava como mencionan algunos autores (e.g.: CRATerre 1979, p.180; International Labour Office 1987, p.30; Houben, Guillaud 1984, p.49; Stulz, Mukerji 1988, p.20; United Nations Centre for Human Settlement 1992, p.7), ver Fig. 2.2-1.
Diferentes experimentos realizados en el "Forschungslabor für experimentelles Bauen" (FEB) (Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales) de la Universidad de Kassel mostraron que el error puede ser de 1700% como se ve en la Fig. 2.2.-3 y en la tabla 2.1. El hecho es que sólo se pueden ver los diferentes estratos con súbitos cambios en la distribución granulométrica, pero estos no pueden coincidir con los límites reales definidos entre la arcilla y el limo y entre el limo y la arena. (ver Fig. 2.2-2).

Ensayo de caída de la bola
La mezcla a ensayar debe ser lo más seca posible y suficientemente húmeda como para formar una bola de 4 cm de diámetro. Cuando esta bola se deja caer desde una altura de 1.5 m sobre una superficie plana pueden ocurrir diferentes resultados como se muestra en la Fig. 2.2-4. Si la bola se aplana levemente y muestra muy pocas o ninguna fisura, como

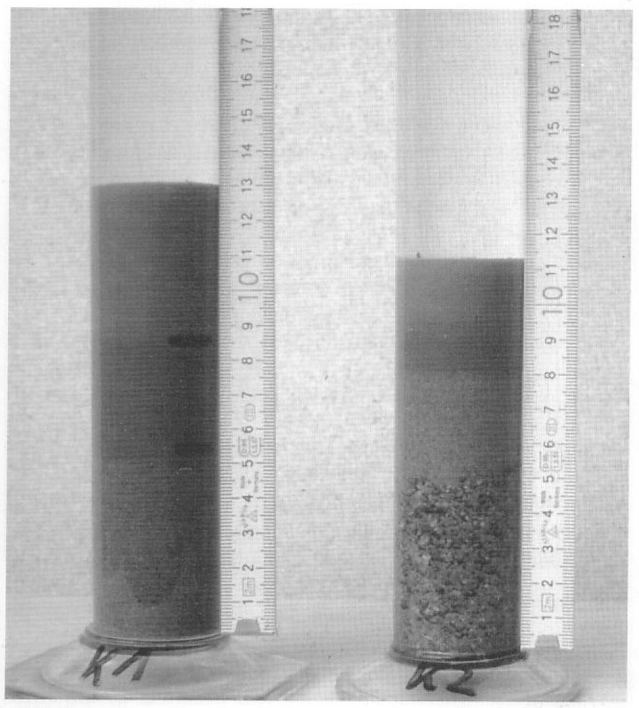
Tab. 2.1 Distribución granulométrica de dos muestras según el ensayo de sedimentación

Muestra de barro	Fracción	Análisis óptico % (vol.)	Análisis óptico % (masa)	Distribución real % (masa)
K1	Arcilla	45	14	6
	Limo	18	26	38
	Arena	37	60	56
K2	Arcilla	36	17	2
	Limo	24	19	16
	Arena	40	64	82

en el ejemplo de la izquierda, esta tiene una alta capacidad aglutinante, que proviene de un contenido de arcilla muy elevado. Por lo general esta mezcla debe rebajarse añadiendo arena. Si el ensayo muestra una apariencia como la del ejemplo de la derecha entonces esta tiene un muy bajo contenido de arcilla. Su capacidad aglutinante es por lo general insuficiente y no puede ser utilizada como material de construcción. En el caso de la tercera muestra a partir de la izquierda esta tiene una relativamente pobre capacidad aglutinante, pero usualmente una composición que le permite ser utilizada para adobes o tierra apisonada.

Ensayo de consistencia
Se forma con tierra húmeda una bola de 2 a 3 cm de diámetro. Con esta bola se forma un rollo de 3 mm de diámetro. Si el rollo se parte o desarrolla grandes fisuras antes de alcanzar 3 mm de diámetro la mezcla deberá ser humedecida gradualmente hasta que el rollo se parta solamente cuando haya alcanzado un diámetro de 3 mm. Con esta mezcla se forma una bola nuevamente. Si no es posible formarla entonces el contenido de arena es muy alto y el de arcilla muy bajo.
Si la bola se puede deshacer entre los dedos pulgar e índice con mucha fuerza, el contenido de arcilla es alto y debe rebajarse añadiendo arena. Si la bola se deshace fácilmente entonces el barro contiene poca arcilla.

Ensayo de cohesión
La muestra de barro debe humedecerse solo lo suficiente para poder formar un rollo de 3 mm de diámetro sin que se parta. Con este rollo se forma una cinta como se puede ver en la Fig. 2.2-5 y se sostiene en la palma de la mano. La cinta se desliza sobre la palma para dejarla colgar tanto como sea posible antes de que se rompa (ver Fig. 2.2-5). Si el pedazo que cuelga antes de romperse es mayor a 20 cm la muestra posee una alta capacidad aglutinante, implicando un contenido de arcilla que es demasiado alto. Si la cinta se parte a pocos centímetros la mezcla tiene un bajo contenido de arcilla.
Este ensayo es inexacto y en el FEB se comprobó que da errores mayores a 200% si el barro no está suficientemente amasado y si el espesor y ancho de la cinta varían.

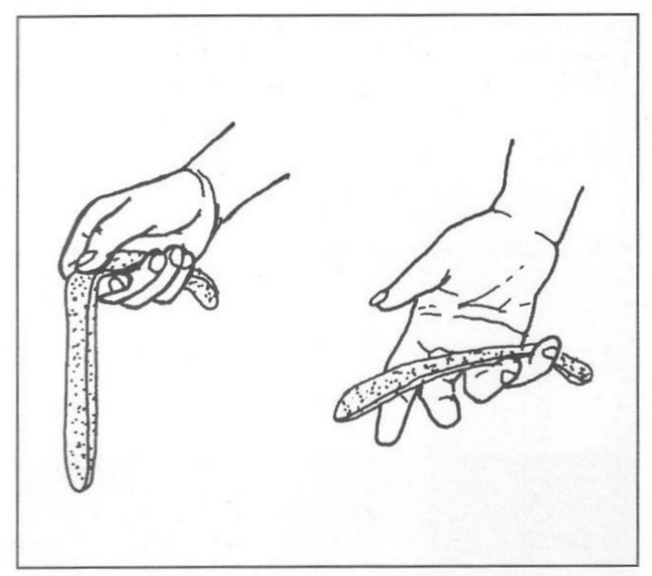


2.2-3 Prueba de sedimentación

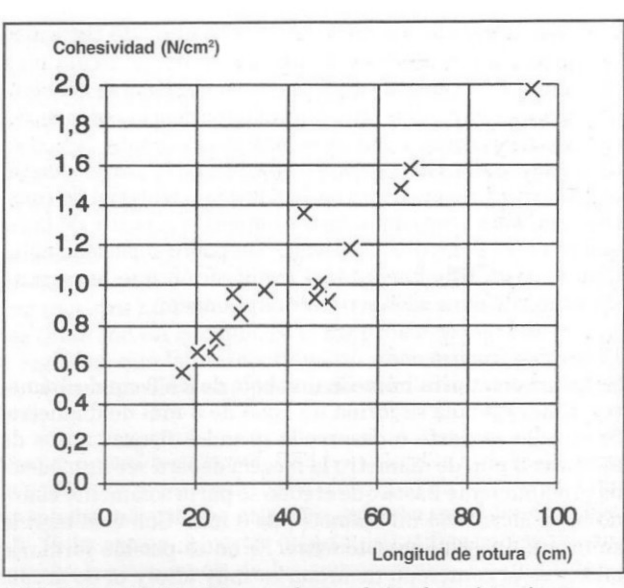
Por lo tanto, se desarrolló una nueva prueba más exacta donde se moldea un perfil de 20 mm. de ancho y 6 mm. de alto prensando el barro con los dedos en una ranura formada por dos perfiles fijos. La superficie se alisa con una botella (ver Fig. 2.2-6, izquierda). Para evitar que el perfil de barro se pegue, se forra la base con una lamina de plástico o papel encerado. Se deja deslizar la cinta lentamente sobre un borde curvo con un radio de curvatura de 1 cm y se mide la longitud de la cinta cuando se rompe por su propio peso. (Figura 2.2-6, derecha). Se tomaron 5 muestras para cada tipo de suelo y se midieron las longitudes de la cinta en el punto de ruptura.
Las longitudes de ruptura mayores de cada grupo se graficaron en la Fig.2.2-7 en relación a la capacidad agluti-



2.2-4 Bolas de barro luego del ensayo de la caída



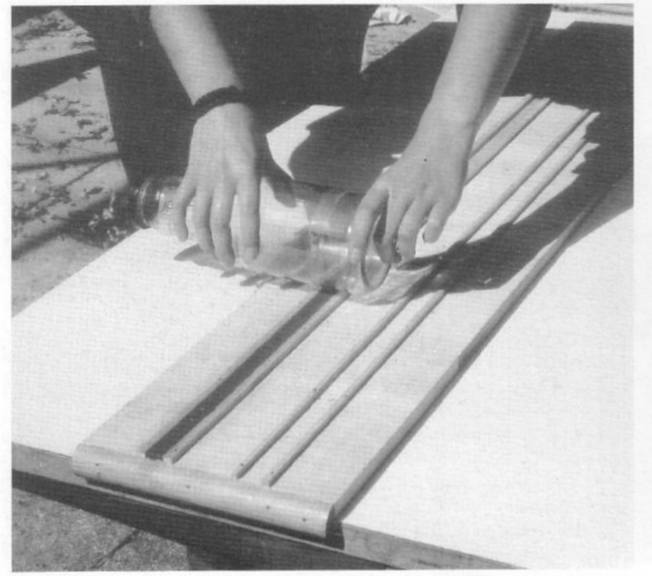
2.2-5 Ensayo de la cinta (cohesión)



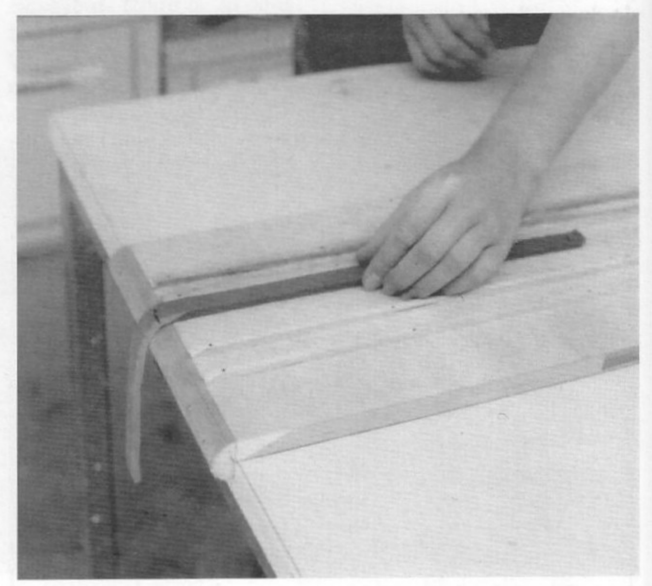
2.2-7 Cohesividad de diferentes barros de igual consistencia en relación a sus longitudes de rotura, ensayados con el ensayo de cohesividad del FEB. (según el ensayo de cohesividad del FEB)

nante de acuerdo al ensayo de la Norma DIN 18952 (ver sección 2.6.1) con un pequeña modificación: en este caso se consideró también la resistencia máxima de las cinco muestras.
Esta consideración se debió a que se encontró que los valores inferiores eran por lo general debidos a un mezclado insuficiente, plasticidad incorrecta u otros errores de preparación. Con el objetivo de garantizar que diferentes mezclas de barro sean comparables entre si se definió la consistencia de las muestras con un diámetro de 70 mm (en vez de 50 mm) del área plana circular que se forma si una bola de 200 g de peso cae desde una altura de 2 m. (Con mezclas de barro arenoso con un bajo contenido de arcilla un diámetro de 50 mm no se puede alcanzar).

Ensayo con ácido clorhídrico (HCl)
Los barros que contienen cal tienen por lo general una apariencia blanca, una baja capacidad aglutinante y son por ello, inapropiados para la construcción con tierra. Con el objetivo de definir el contenido de cal de una muestra se agrega una gota de solución de 20% de HCI utilizando una varilla de cristal o madera. En el caso de un barro con contenido de cal se produce CO_2 de acuerdo a la ecuación $CaCO_3 + 2HCL = CaCl_2 + CO_2 + H_2O$. Esta producción de CO_2 se nota debido a la reacción efervescente que



2.2-6 Ensayo de cohesividad desarrollado por el FEB.



aparece; si no hay efervescencias el contenido de cal es menor del 1%. Si aparece una efervescencia débil el contenido de cal es de 1 a 2%; si son significativas el contenido de cal es de 3 a 4%; y si son muy fuertes y permanentes el contenido de cal es mayor a 5% (Voth, 1978, p.57). Se debe tener en cuenta que un barro oscuro libre de cal con un alto contenido de humus puede mostrar también este fenómeno.

2.3 Efectos del agua

2.3.1 Generalidades

Si el barro se humedece este se expande y cambia de un estado sólido a uno plástico.

2.3.2 Expansión y retracción

La expansión del barro al entrar en contacto con el agua así como su retracción al secarse son desventajosos para su uso como material de construcción. La expansión ocurre solamente si el barro entra en contacto directo con mucha agua perdiendo así su estado sólido. La absorción de humedad del aire sin embargo no conduce a la expansión.

La magnitud de la expansión y la retracción depende del tipo y cantidad de arcilla (la arcilla montmorilonita tiene un efecto mayor que la caolinita o la illita) y también de la distribución granulométrica del limo y la arena.

Se llevaron a cabo experimentos en el FEB, utilizando muestras de 10x10x7 cm. de diferentes mezclas de barro que fueron sumergidas en 80 cm^3 de agua y secadas luego en un horno a 50°C para estudiar las fisuras de retracción (Fig. 2.3-1). La muestra de ladrillo crudo producido industrialmente (Fig. 2.3-1, arriba izquierda), cuya curva granulométrica se puede ver en la Fig.2.1-1 (arriba) presenta grandes grietas de retracción. Una mezcla similar con el mismo tipo y cantidad de arcilla pero con una distribución "optimizada" de limo y arena casi no presenta grietas al secar (Fig. 2.3-1 arriba derecha). La muestra de bloques de tierra limosa (Fig. 2.3-1 abajo derecha), cuya curva granulométrica se puede ver en la Fig. 2.1-1 centro) presenta muchas fisuras delgadas, en cambio la muestra de bloques de tierra arenosa (Fig. 2.3-1, abajo izquierda) cuya curva granulométrica se ve en la Fig. 2.1-1 abajo) no muestra grietas en absoluto. Cómo minimizar la retracción cambiando la distribución granulométrica se explica en la sección 4.2.

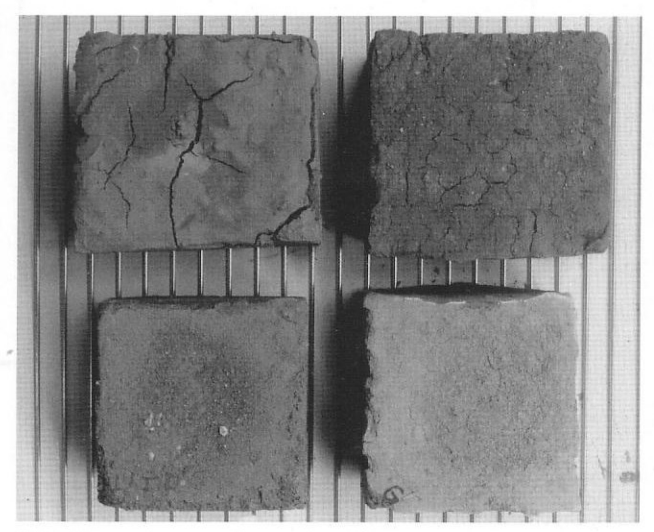
2.3.3 Determinación de la retracción lineal

Para comparar la proporción de retracción de diferentes muestras de barro es necesario que estas tengan una plasticidad comparable. La Norma Alemana DIN 18952 describe los siguientes pasos requeridos para obtener esa consistencia estándar:

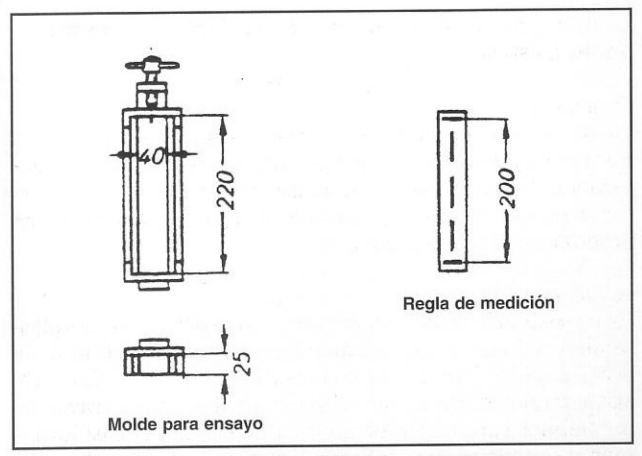
1. La mezcla seca de barro debe molerse y tamizarse para eliminar todas las partículas con diámetros mayores a 2 mm.
2. Aproximadamente 1200cm^3 de este material se humedece levemente y se martilla en una superficie plana de tal manera que se obtenga una pieza uniforme (similar a un panqueque grueso).
3. Se corta con un cuchillo esta pieza en tiras de 2 cm de ancho, estas tiras se paran y se colocan pegadas y luego se martilla nuevamente. Este procedimiento se repite hasta que la base de la pieza tenga una estructura homogénea.
4. Un barro con alto contenido de arcilla debe reposar durante 12 horas y uno con bajo contenido de arcilla aproximadamente 6 horas de tal manera que el contenido de agua sea uniformemente distribuido en la muestra.
5. Se toman 200 g de esta mezcla y se moldean en forma de una bola.
6. Este bola se deja caer desde una altura de 2 m sobre una superficie plana.
7. Si el diámetro de la superficie aplanada que se forma es de 50 mm se puede decir que se ha alcanzado una consistencia estándar. La diferencia entre el diámetro mayor y el menor del disco no debe ser mayor a 2 mm.
8. Si el diámetro de la esfera es superior a 50 mm. la mezcla debe dejarse secar. Si el diámetro del disco es menor a 50mm entonces se deben añadir algunas gotas de agua. En ambos casos todo el proceso se debe repetir hasta alcanzar el diámetro exacto.

Habiéndose obtenido esta consistencia estándar, el ensayo de retracción se realiza de la siguiente manera:

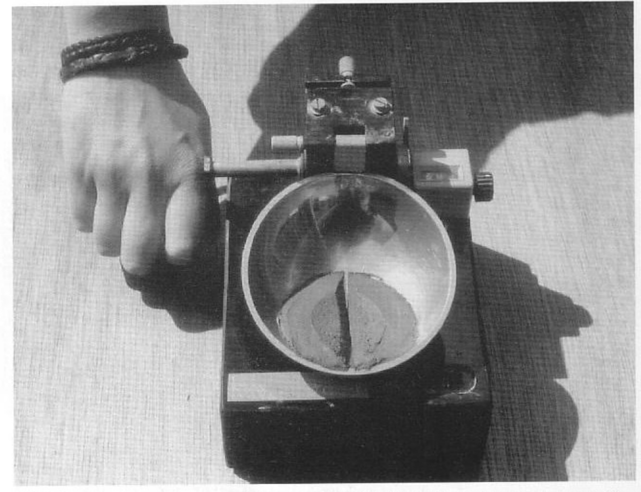
1. El material se compacta reiteradamente con un pedazo de madera de 2x2 cm de sección dentro del molde que se muestra en la Fig. 2.3-2, el mismo que descansa sobre una superficie plana.
2. Se deben hacer tres muestras y se debe desmoldar inmediatamente.



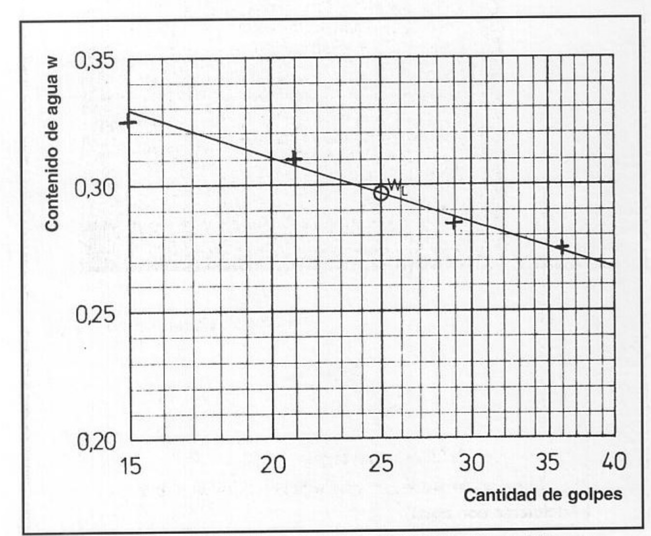
2.3-1 Ensayo de expansión y retracción



2.3-2 Herramientas para distinguir la retracción lineal de acuerdo a la Norma Alemana DIN 18952



2.3-3 Instrumento para obtener el límite líquido, según Casagrande



2.3-4 Derivación del límite líquido con el método de multipuntos según la Norma Alemana DIN 18122

3. En la cara de 40 mm. de la muestra se hace con la ayuda de la regla que se ve en la Fig. 2.3-2, dos rayas con cuchillo a una distancia de 200 mm.
4. Las tres muestras deben secar durante tres días en un espacio cerrado, con una temperatura del ambiente de 20°C. Luego se calientan a más de 60°C en un horno, hasta que no se puedan medir más las retracciones. La DIN menciona que se debe secar las muestras sobre una plancha de vidrio aceitada. El FEB sugiere que la plancha este cubierta con una fina capa de arena ya que esta hace que el proceso de secado sea más uniforme y evita la fricción.
5. El promedio de retracción de las tres muestras en relación a la longitud de 200 mm. brinda una retracción lineal expresada en porcentaje. Si la retracción de una muestra difiere de las otras por más de 2 mm, se debe repetir todo el proceso.

2.3.4 Plasticidad

El barro puede tener cuatro estados de consistencia: líquido, plástico, semisólido y sólido. Los límites de estos estados se definieron por el científico sueco Atterberg.

Límite líquido
El límite líquido (LL) define el contendido de agua en el límite entre el estado líquido y el plástico. Está expresado en porcentaje y se determina con el instrumento Casagrande que se muestra en la Fig. 2.3-3 utilizando los siguientes pasos:

1. La mezcla debe reposar durante largo tiempo en agua (si tiene un alto contenido de arcilla hasta cuatro días) y luego es pasada a través de un tamiz con una malla de 0.4 mm
2. Se colocan en el recipiente del equipo de 50 a 70 gramos de esta mezcla en consistencia pastosa y se uniforma la superficie. El espesor máximo en el centro debe ser de 1 cm.
3. Se hace una ranura en la superficie con una herramienta especial, que deberá mantenerse siempre perpendicular a la superficie del recipiente.
4. Girando la manilla a una velocidad de 2 ciclos por segundo, el recipiente es levantado y soltado hasta que la ranura se cierre a una longitud de 10 mm.
5. La cantidad de golpes se cuentan y se toma una muestra de 5 cm^3 del centro para distinguir el contenido de agua. Cuando la ranura se cierra con 25 golpes el contenido de agua de la mezcla es igual al límite líquido.

Debido a que consume mucho tiempo cambiar el contenido del agua reiteradamente hasta que la ranura se cierra exactamente a los 25 golpes, se ha desarrollado un método que se describe en la norma alemana DIN 18122, que permite hacer el ensayo con cuatro distintos contenidos de agua si el número de golpes está entre 15 y 40. La Fig. 2.3-4 muestra como la humedad líquida se obtiene empleando estos cuatro ensayos. Los cuatro valores se anotan en un diagrama en el que la coordenada horizontal muestra, en una escala logarítmica, el número de golpes y la coordenada vertical muestra el contenido de agua en porcentaje. El límite líquido se obtiene al trazar una línea a través de los

cuatro valores y leyendo los valores interpolados en la coordenada de 25 golpes.

Límite plástico
El límite plástico (PL) es el contenido de agua en porcentaje en el límite del estado plástico y el semisólido. Para definirlo se puede seguir el siguiente procedimiento:
La misma mezcla que fue utilizada para definir el límite líquido se moldea con la mano en forma de pequeños rollos de 3 mm. de diámetro sobre una superficie absorbente (cartón, madera blanda o material similar). Posteriormente se moldean en forma de bolas y se vuelven a rodar para hacer los rollos. Este procedimiento debe repetirse hasta que los rollos comiencen a desmoronarse a un diámetro de 3 mm.
De esta mezcla se extraen aproximadamente 5 g y se pesan inmediatamente, luego se dejan secar para obtener el contenido de agua. Este ensayo se debe repetir tres veces. El valor promedio de tres muestras que no difiera más de 2% es idéntica al límite plástico.
Cuando ya se han definido los límites plástico y líquido empleando una mezcla que solo tiene partículas menores a 0.4 mm los resultados del ensayo deben ser corregidos si partículas mayores fueron cernidas antes. Si esta porción es menor a 25% del peso seco de toda la mezcla el contenido de agua puede calcularse utilizando la siguiente fórmula:

$$W_0 = \frac{L}{1 - A}$$

Donde, W_0 es el valor del contenido de agua calculado incluyendo las partículas mayores, L el contenido de agua determinado en el límite líquido y plástico respectivamente y A el peso de las partículas mayores a 0.4 mm, expresado como un porcentaje del peso seco de toda la mezcla.

Indice de plasticidad
La diferencia entre el límite líquido (LL) y el plástico (PL) se denomina índice de plasticidad (PI). En la Tabla 2.2 se indican algunos valores para LL, PL y PI.

Índice de consistencia
El índice de consistencia (C) se puede calcular para cualquier contenido de agua existente (W) del estado plástico con la siguiente fórmula:

$$C = \frac{LL - W}{LL - PL} = \frac{LL - W}{PI}$$

Tabla 2.2 Indice de plasticidad de barros (Según Voth, 1978)

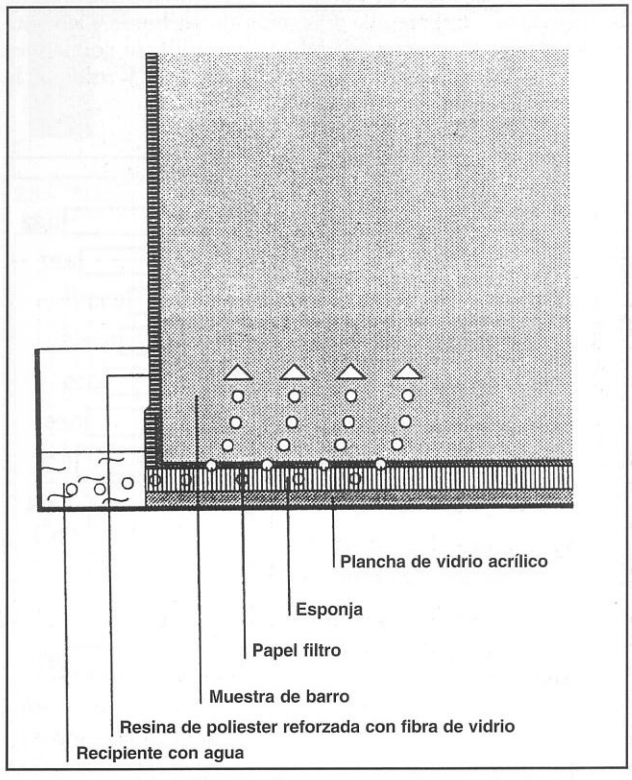
Tipo de barro	LL (%)	PL (%)	PI = LL - PL
Muy arenoso	10 - 23	5 - 20	< 5
Muy limoso	15 - 35	10 - 25	5 - 15
Muy arcilloso	28 - 150	20 - 50	15 - 95
Bentonita	40	8	32

El índice de consistencia es 0 en el límite líquido y 1 en límite plástico.

Consistencia estándar
Debido a que la definición del límite plástico de Atterberg no es muy exacta Niemeyer sugiere la "consistencia estándar" como base de comparación de mezclas de igual consistencia. El método para obtener esta consistencia se describe en la sección 2.3.3.

Aplastamiento
La consistencia de mezclas de mortero se define por el aplastamiento. Este se puede especificar a través de un método descrito en las Normas Alemanas DIN 1060 (parte 3) o DIN 1048 (parte 1). En el que, el mortero se vierte a través de un embudo estandarizado sobre una plancha que es levantada y soltada por un definido tipo y número de golpes. El diámetro de la muestra que se forma se mide en centímetros y se denomina aplastamiento.

Límite de retracción
El límite de retracción (SL) define el límite entre el estado semisólido y el sólido. Es el límite donde ya no ocurre más retracción. Con suelos arcillosos se puede distinguir visualmente cuando el color oscuro de la mezcla húmeda se torna más claro debido a la evaporación del agua por los poros. Este no es un método exacto de medición, pero es un método práctico y común.



2.3-5 Ensamblaje del equipo de ensayo para obtener el valor w de las muestras de barro (Boemans, 1990)

2.3.5 Acción capilar

Movimiento del agua
Todos los materiales con una estructura porosa como el barro son capaces de almacenar y transportar agua a través de sus vasos capilares. De ese modo el agua se mueve de regiones de mayor humedad hacia regiones de menor humedad. La capacidad del agua para ser absorbida se denomina "capilaridad" y el proceso de transportación de agua se denomina "acción capilar". La cantidad de agua (W) que puede ser absorbida durante un período de tiempo se define por la fórmula:

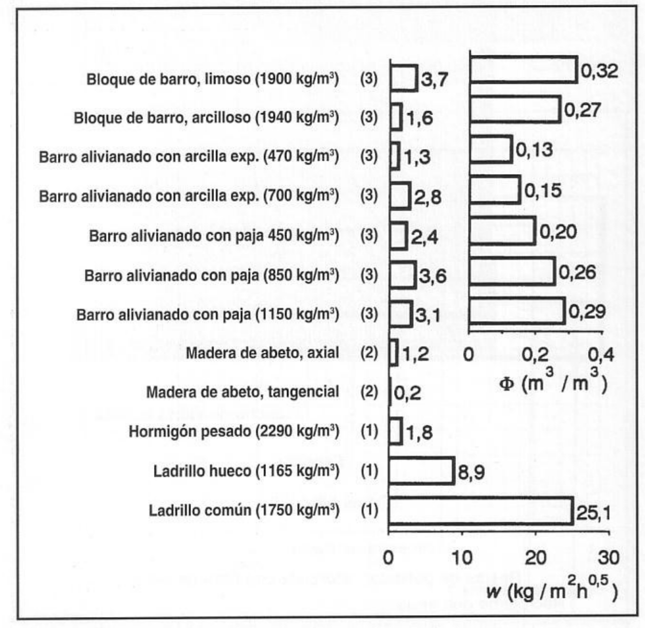
$$W = w\sqrt{t}\ [kg/m^2]$$

Donde, w es el coeficiente de absorción de agua medido en $kg/m^2h^{0.5}$ y t el tiempo en horas.

Determinación del coeficiente de absorción de agua
El coeficiente de absorción de agua (w) se obtiene de acuerdo a la Norma Alemana Din 52617 de la siguiente manera: Una muestra de barro en forma de cubo se coloca sobre una superficie plana y se sumerge aproximadamente 3 mm en agua y su incremento de peso se mide periódicamente. El coeficiente (w) es entonces calculado por la fórmula:

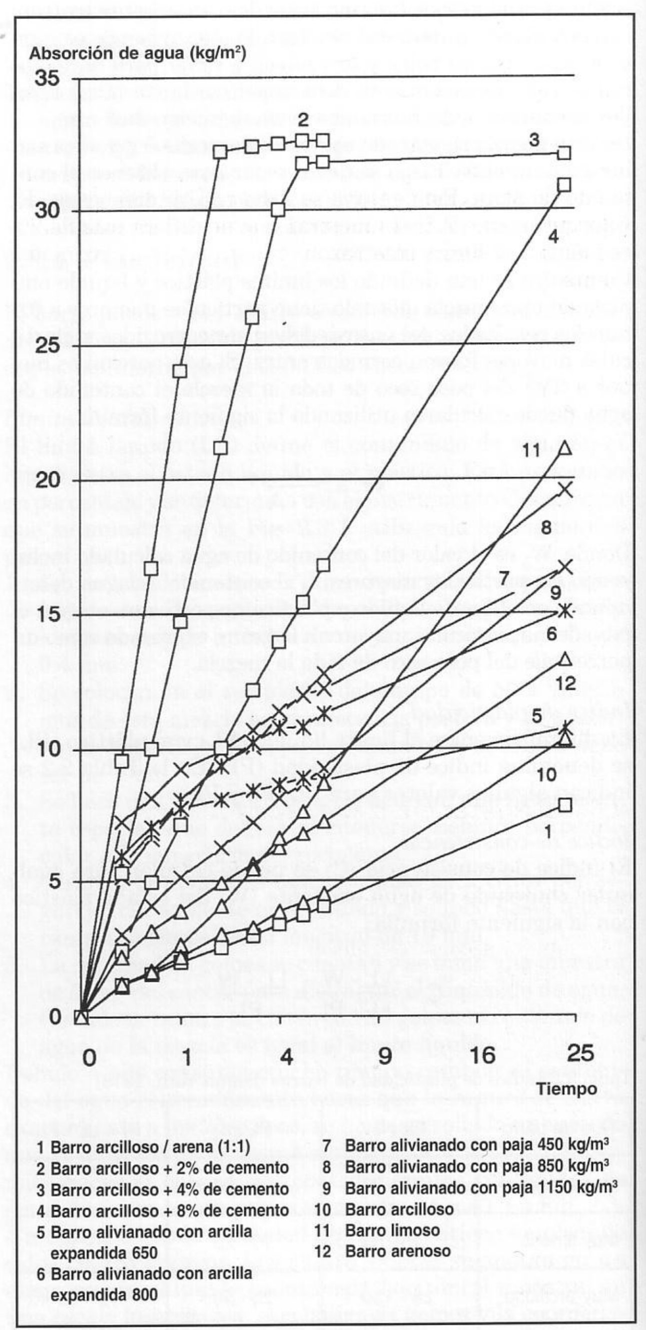
$$w = \frac{W}{\sqrt{t}}\ [kg/m^2h^{0.5}]$$

Donde, W es el incremento en peso por unidad del área de la superficie y t el tiempo transcurrido en horas. Con este ensayo las cuatro caras del cubo deben sellarse de manera tal que no penetre agua por estas superficies y solo por la cara inferior.



2.3-6 Coeficiente de absorción de agua w de barros en comparación con materiales de construcción comunes

El problema con las muestras de barro es que se expande y erosiona bajo el agua. Por eso el FEB desarrolló un método especial para evitarlo: Deben cubrirse las cuatro caras de la muestra con una resina de poliester reforzada con fibra de vidrio para evitar la penetración del agua por los lados así como la expansión y deformación del cubo. Con el objetivo de prevenir la erosión de las partículas de la superficie sumergida, un papel de filtro se fija debajo y se pega a las



2.3-7 Absorción de agua de diferentes barros

caras de la resina de poliéster. Para evitar la deformación del barro debilitado en la base, durante el pesado se coloca una esponja de 4 mm de espesor sobre una plancha de vidrio acrílico (ver Fig. 2.3-5). Con el objetivo de comparar ambos métodos, se realizó un ensayo con un ladrillo cocido y este mostró que el método de el FEB redujo el resultado solo en un 2%.
El coeficiente w de diferentes barros ensayados junto con los valores de w de materiales de construcción comunes, se lista en la Fig. 2.3-6. Es interesante que las muestras de un suelo limoso presenten valores-w más altos que los de suelos arcillosos. La comparación con ladrillos cocidos muestra sorprendentemente que el barro tiene valores w que son menores por un factor de 10.
La absorción de agua en relación al tiempo es también muy interesante y se muestra en la Fig.2.3-7. Se puede observar el sorprendente efecto de un enorme incremento en la absorción de agua cuando se adicionan pequeñas cantidades de cemento.

Capacidad de agua capilar
La máxima cantidad de agua que puede ser absorbida en comparación con el volumen o masa de la muestra se denomina capacidad de agua capilar f, expresada en [kg/m³] o [m³/m³]. Este es un valor importante si se considera el fenómeno de la condensación en los elementos de construcción. En la Fig. 2.3-6 estos valores se muestran con los valores w.

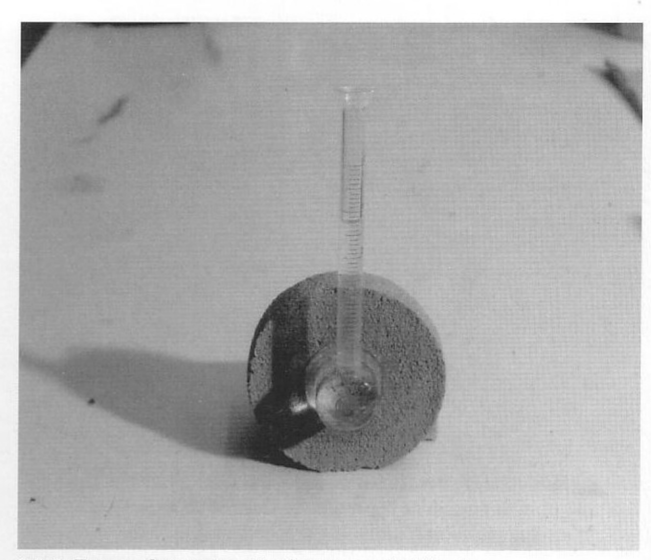
Ensayo de penetración de agua según Karsten
En el ensayo de penetración de agua de Karsten un recipiente esférico de vidrio de 30 mm. de diámetro con un cilindro de medición adosado se fija con silicona a la muestra del ensayo, de tal manera que la superficie en contacto con el agua sea 3 cm², ver Fig. 2.3-8 (Karsten, 1983). El método usual es problemático con el agua debido a que la muestra se disuelve en la superficie de contacto. Por esto el FEB modificó el método sellando la abertura del recipiente de vidrio con papel de filtro (ver Fig. 2.3-9 derecha). Los resultados con este método son comparables a los obtenidos con el método que ofrece la Norma Alemana DIN 52617 (ver Fig. 2.3-10).

2.3.6 Estabilidad en agua estática

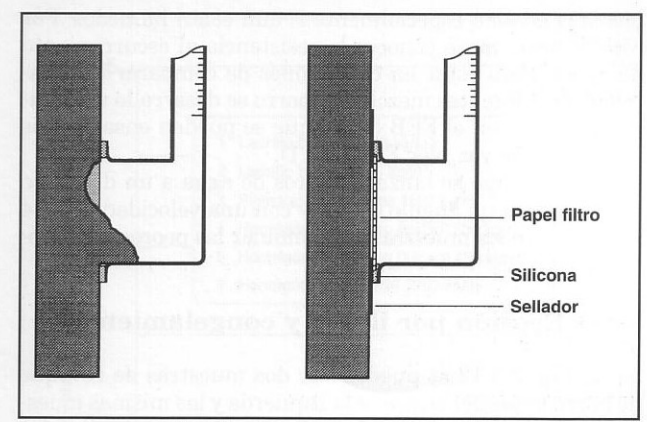
La estabilidad en agua estática se puede definir según la Norma Alemana DIN 18952, parte.2, de la siguiente manera: Una muestra prismática se sumerge a 5 cm de profundidad en agua y se mide el tiempo en el que se disuelve la porción sumergida. De acuerdo a esa norma las muestras que se desintegran en menos de 45 minutos son inadecuadas para la construcción con tierra. Para los procedimientos de la construcción con tierra este ensayo es innecesario, debido a que los elementos de tierra en ningún caso están permanentemente sumergidos en agua. En cambio, es la resistencia al escurrimiento del agua la que es significativa.

2.3.7 Resistencia al escurrimiento del agua

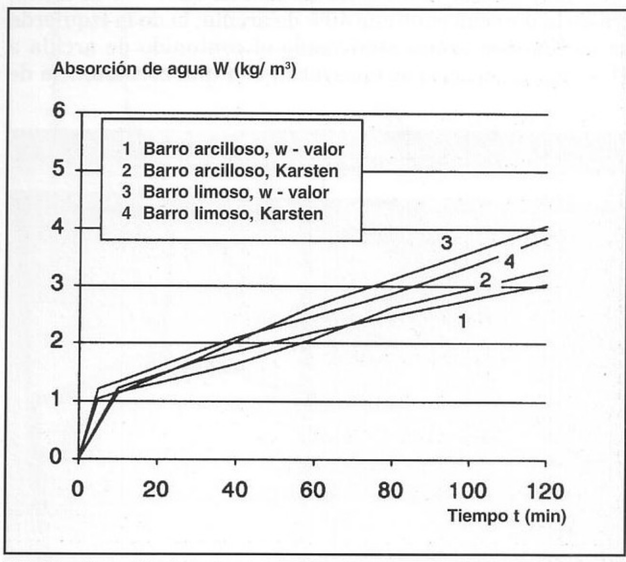
Durante el proceso de construcción los elementos de tierra generalmente no están protegidos de la lluvia y son sensi-



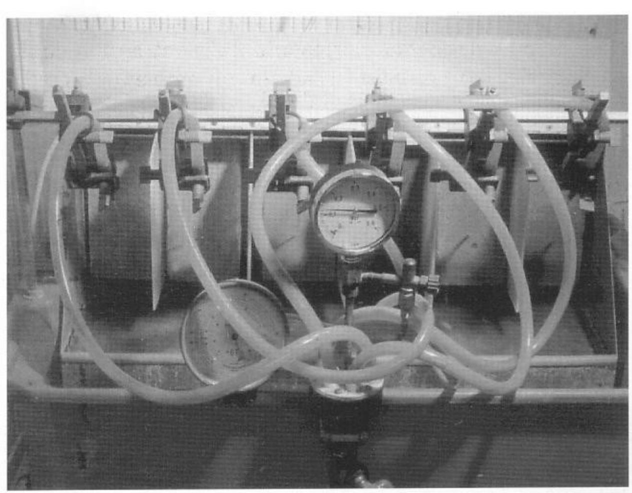
2.3-8 Ensayo de penetración de agua según Karsten



2.3-9 Ensayo modificado de penetración de agua según el FEB



2.3-10 Absorción de agua según Karsten y según la Norma Alemana DIN 52617



2.3-11 Equipo de ensayo de aspersión de chorros de agua para simular una fuerte lluvia, desarrollado por el FEB.

bles a la erosión especialmente si aún están húmedos. Por esto es importante conocer la resistencia al escurrimiento del agua. Para estar en condiciones de comparar la resistencia de diferentes mezclas de barro se desarrollo un equipo de ensayo en el FEB con el que se pueden ensayar seis muestras a la vez (ver Fig. 2.3-11).
Con este equipo se lanzan chorros de agua a un diámetro de 4 mm, con un ángulo de 45° y con una velocidad de 3.24 m/seg. sobre los muestras para simular las peores condiciones de lluvia.

2.3.8 Erosión por lluvia y congelamiento

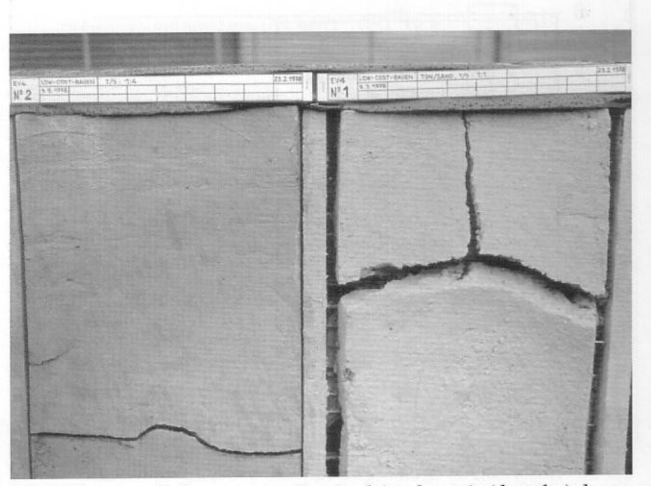
En la Fig. 2.3-12 se pueden ver dos muestras de revoque de barro antes del ensayo a la izquierda y las mismas muestras a la derecha, luego de tres años de exposición a las inclemencias del tiempo. La mezcla de tierra de la muestra de la derecha contiene 40% de arcilla; la de la izquierda se mezcló con arena reduciendo el contenido de arcilla a 16%. Estas mezclas se ensayaron con una consistencia de mortero, de una sola capa de 5 cm de espesor. Luego de secar, aparecieron grandes grietas de retracción. La mezcla arcillosa presentó 11% de retracción lineal, mientras que la arenosa solo 3%. Luego de tres años de exposición a las inclemencias del tiempo, el suelo arcilloso presentó un hundimiento provocado por el congelamiento. Este fenómeno es producto de las fisuras que aparecieron durante el secado a través de las cuales se filtro el agua de lluvia por la acción capilar. Cuando esta agua se congela, su volumen incrementa provocando rajaduras y hundimiento en las capas.
En áreas donde no aparecieron fisuras finas esto no ocurrió. La muestra de la izquierda no presentó este tipo de erosión después de tres años. En esta muestra, se observa que un poco de barro se lavo por la lluvia de modo tal que la fisura horizontal de retracción fue rellenada parcialmente por estas partículas, no presenta erosión por congelamiento, solamente erosión por lluvia. Esto debido a que no habían fisuras y debido a que el barro tenia poros suficientemente grandes en los cuales el agua congelada pudo expandirse.
A partir de este ensayo se puede distinguir lo siguiente:

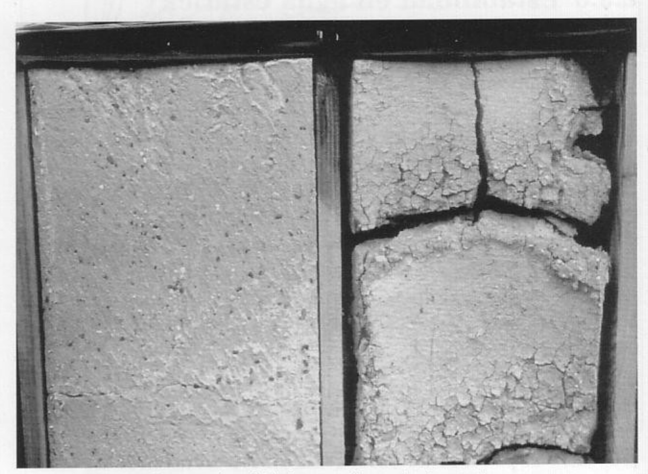
- Un barro arenoso tiene poca resistencia a la acción de la lluvia, pero es prácticamente resistente al congelamiento, cuando no tiene fisuras.
- Un barro con alto contenido de arcilla tiende a desarrollar fisuras cuando seca y por eso es propenso a la erosión por congelamiento. Si no tiene fisuras es prácticamente resistente a la acción de lluvia.

Mientras mayor la porosidad y más grandes los poros, mayor es la resistencia del barro al congelamiento. Por eso los ladrillos crudos, extruidos en fabricas no son resistentes al congelamiento y no deben ser utilizados para muros exteriores en climas con temporadas de heladas. Sin embargo los adobes elaborados a mano con barro arenoso usualmente son resistentes al congelamiento.

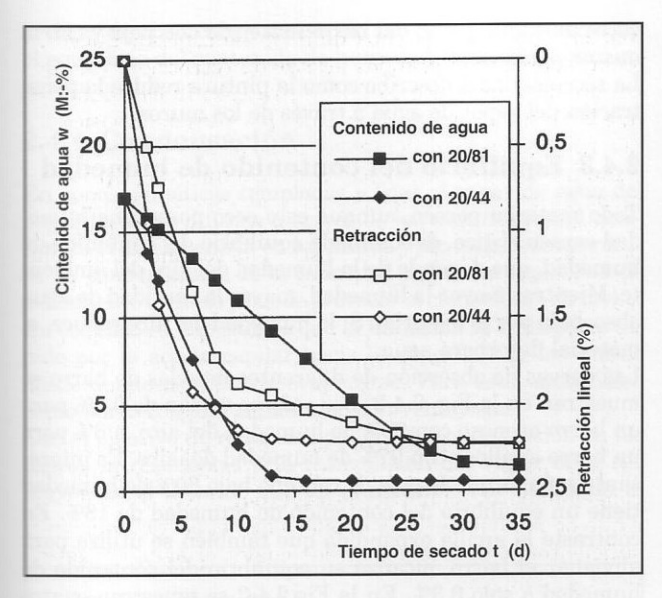
2.3.9 Período de secado

El período en el que un barro húmedo alcanza su equilibrio en el contenido de humedad se denomina período de





2.3-12 Muestras de barro antes (izquierda) y después (derecha) de ser expuestas a las inclemencias del tiempo durante tres años



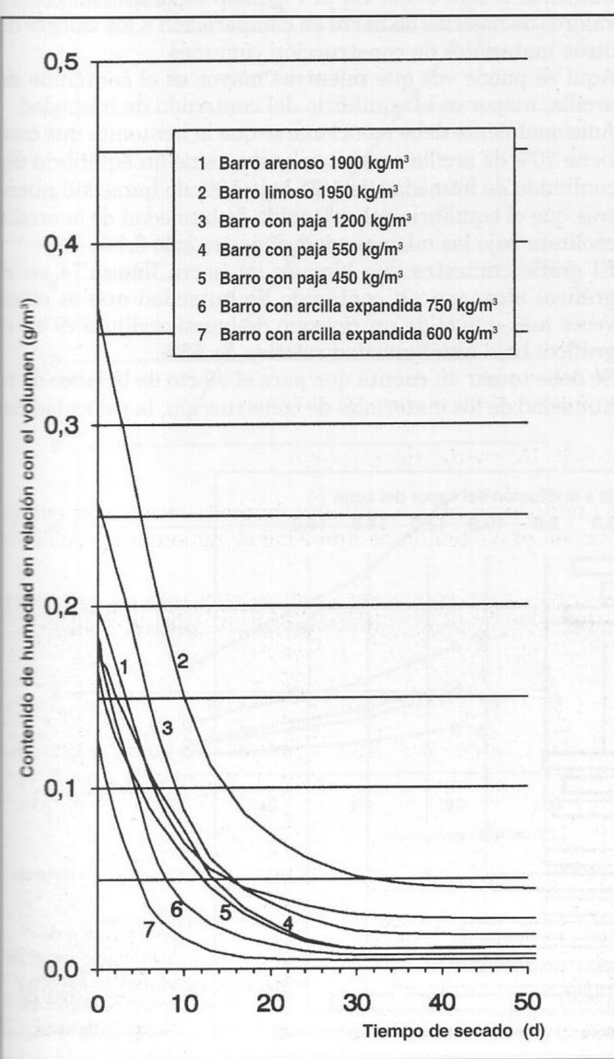
secado. En la Fig. 2.3-13, se muestra la disminución del contenido de agua y el incremento de la retracción de un mortero de barro arenoso secado en un ambiente cerrado, a una temperatura de 20°C y con una humedad relativa del aire del ambiente de 81% y 44% respectivamente. Con una humedad relativa de 44% el período de secado terminó después de 14 días, mientras que con 81% terminó después de 30 días aproximadamente. La Fig. 2.3-14 representa el proceso de secado de diferentes muestras de barro en comparación con otros materiales de construcción. En

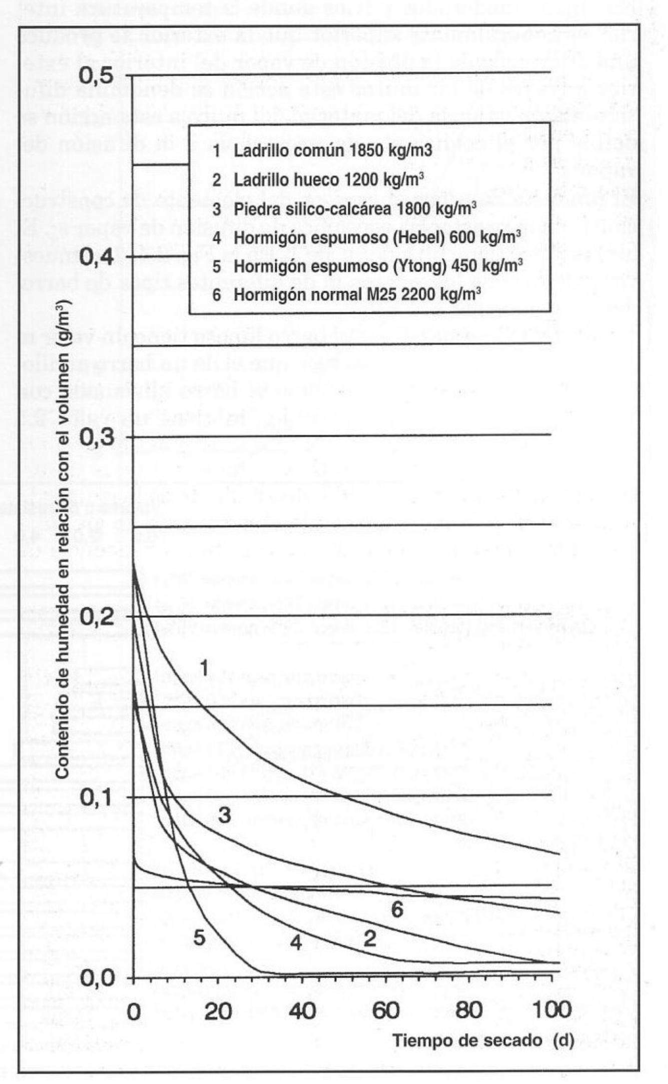
Izquierda:

2.3-13 Retracción lineal y período de secado de mortero de barro (4% arcilla, 25% de limo, 71% de arena) con un aplastamiento de 42 cm, según la Norma Alemana DIN 18555, parte 2

Debajo:

2.3-14 Comportamiento al secado de barros en comparación con otros materiales





este ensayo realizado por el FEB muestras del tamaño de un ladrillo se sumergieron a una profundidad de 3 mm en agua durante 24 horas y luego se colocaron en un espacio cerrado con una temperatura de 23°C y 50% de humedad relativa. Interesante resultó que luego de 20 a 30 días las muestras de barro habían secado mientras que los ladrillos cocidos, los ladrillos de cal-arena y los de concreto aún a los 100 días no habían secado.

2.4 Efecto del vapor

2.4.1 Generalidades

El barro en contacto con el agua se expande y ablanda, en cambio bajo la influencia del vapor, este absorbe la humedad pero permanece sólido y mantiene su rigidez sin expandirse. Así, el barro puede balancear la humedad del aire interior como se describe en detalle en la sección 1.4.

2.4.2 Difusión del vapor

En climas moderados y fríos donde la temperatura interior es generalmente superior que la exterior se produce una diferencia de la presión de vapor del interior al exterior a través de las muros esta acción se denomina difusión. La resistencia del material del muro a esta acción se define por el coeficiente de resistencia a la difusión del vapor m.

El producto de μ por el espesor del elemento de construcción s, da la resistencia específica de difusión de vapor s_d. El aire estático tiene un valor s_d de 1. En la Fig. 2.4.-1 se muestran algunos de los valores m de diferentes tipos de barro, determinados por el FEB.

Es interesante señalar que el barro limoso tiene un valor m aproximadamente 20% más bajo que el de un barro arcilloso y un barro arenoso. Asimismo el barro alivianado con arcilla expandida que pesa 750 kg/ m^3 tiene un valor 2.5 veces más alto que el del barro mezclado con paja y con la misma densidad.

La sección 12.3.4 describe como la pintura reduce la penetración del vapor de agua a través de los muros.

2.4.3 Equilibrio del contenido de humedad

Todo material poroso, aunque este seco posee una humedad característica, denominada equilibrio del contenido de humedad, que depende de la humedad del aire del ambiente. Mientras mayor la humedad, mayor la cantidad de agua absorbida por el material. Si la humedad del aire reduce, el material desorberá agua.

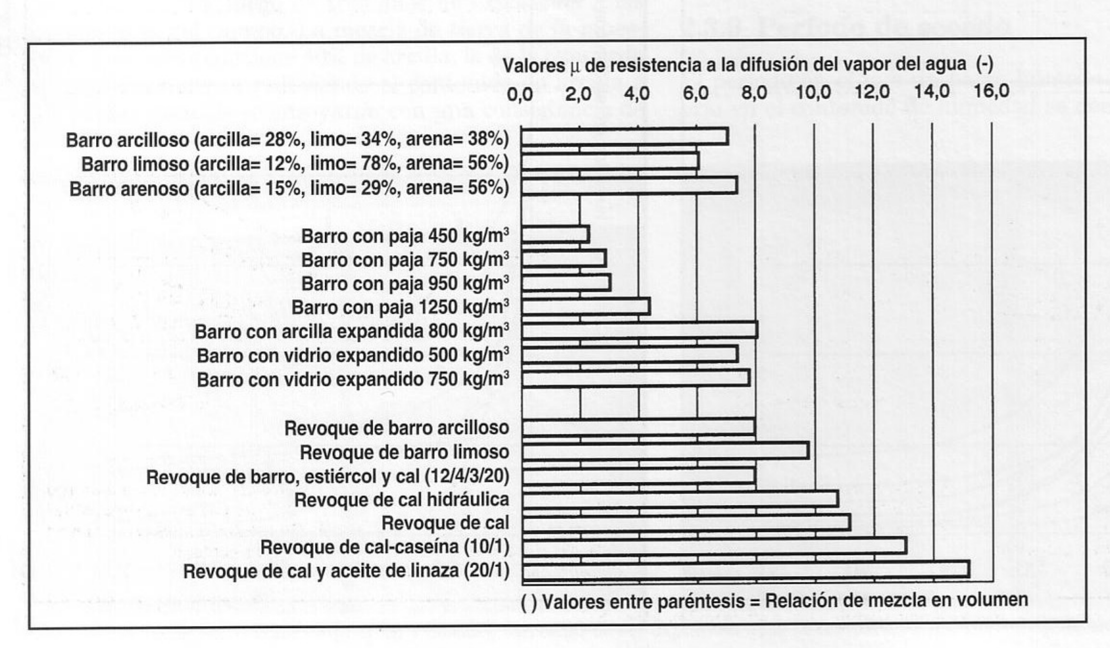
Las curvas de absorción de diferentes mezclas de barro se muestran en la Fig. 2.4-2. Los valores varían de 0.4% para un barro arenoso con 20% de humedad del aire, a 6% para un barro arcilloso con 97% de humedad del aire. Es interesante señalar que la paja de centeno bajo 80% de humedad tiene un equilibrio del contenido de humedad de 18%. En contraste la arcilla expandida que también se utiliza para alivianar el barro, alcanza su equilibrio del contenido de humedad a solo 0.3%. En la Fig.2.4-3 se muestran cuatro valores de mezclas de barro en comparación a los valores de otros materiales de construcción comunes.

Aquí se puede ver que mientras mayor es el contenido de arcilla, mayor es el equilibrio del contenido de humedad.

Adicionalmente debe mencionarse que la bentonita que contiene 70% de arcilla montmorilonita, tiene un equilibrio del contenido de humedad de 13% bajo 50% de humedad mientras que el equilibrio del contenido de humedad de la arcilla caolinita bajo las mismas condiciones es solo 0.7%.

El gráfico muestra que bloques de tierra limosa (4 en el gráfico) alcanzan un contenido de humedad que es cinco veces más que el de un revoque de barro arcilloso (9 en el gráfico) bajo una humedad relativa de 58%.

Se debe tomar en cuenta que para el efecto de balance de la humedad de los materiales de construcción, la velocidad del



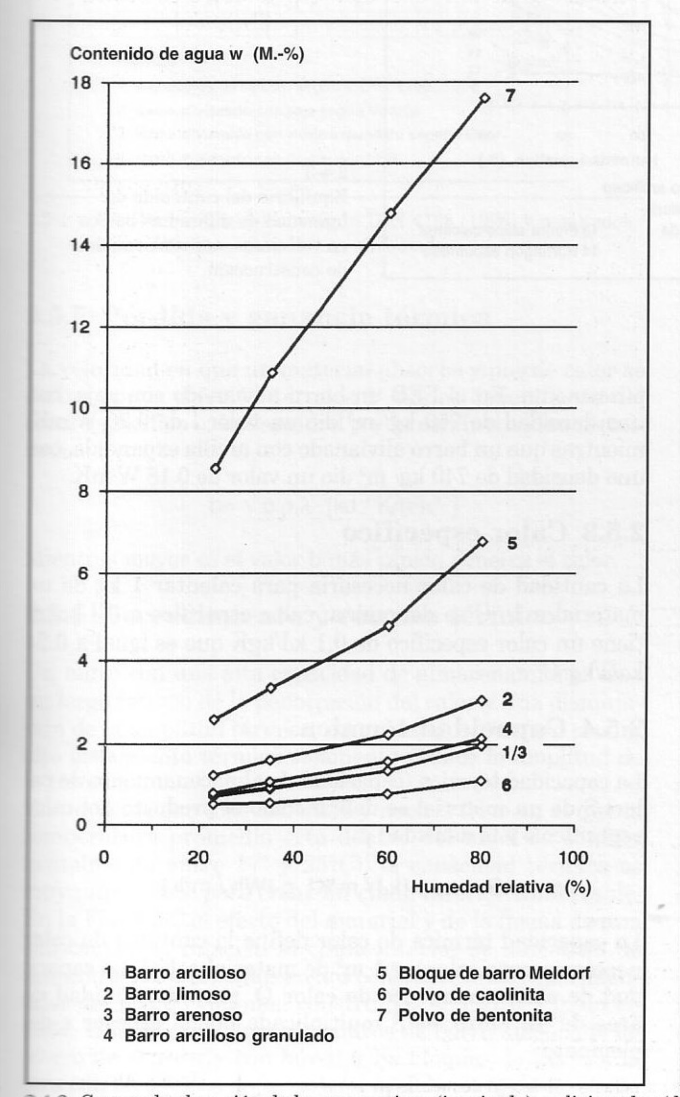
2.4-1
Coeficiente μ de difusión de vapor de diferentes barros y revoques según la Norma Alemana DIN 52615.

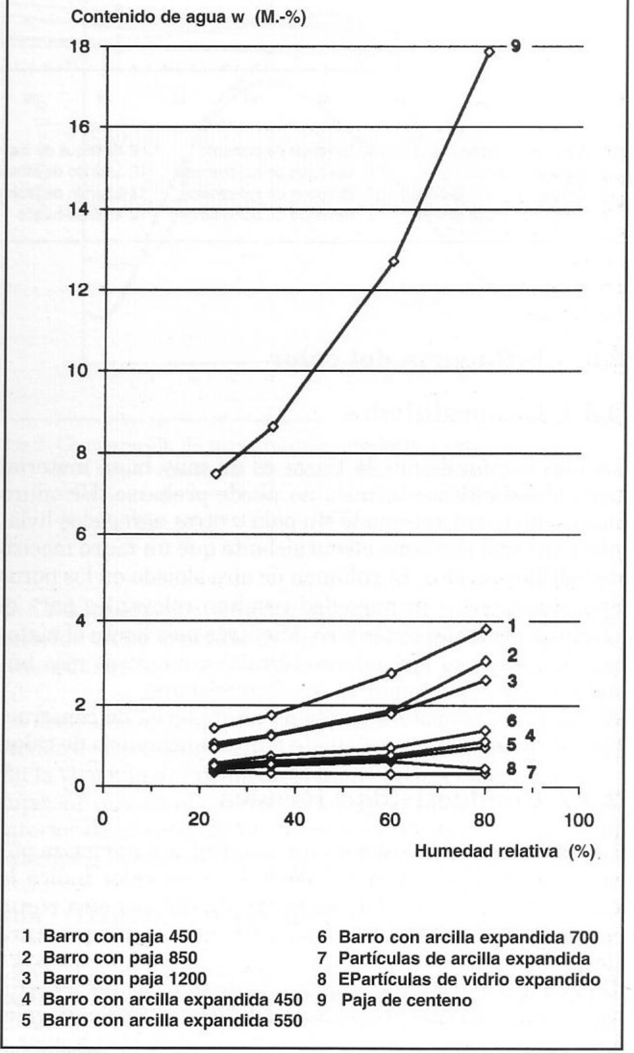
proceso de absorción y desorción son más importantes que el equilibrio del contenido de humedad, como se explicó en la sección 1.4.

2.4.4 Condensación

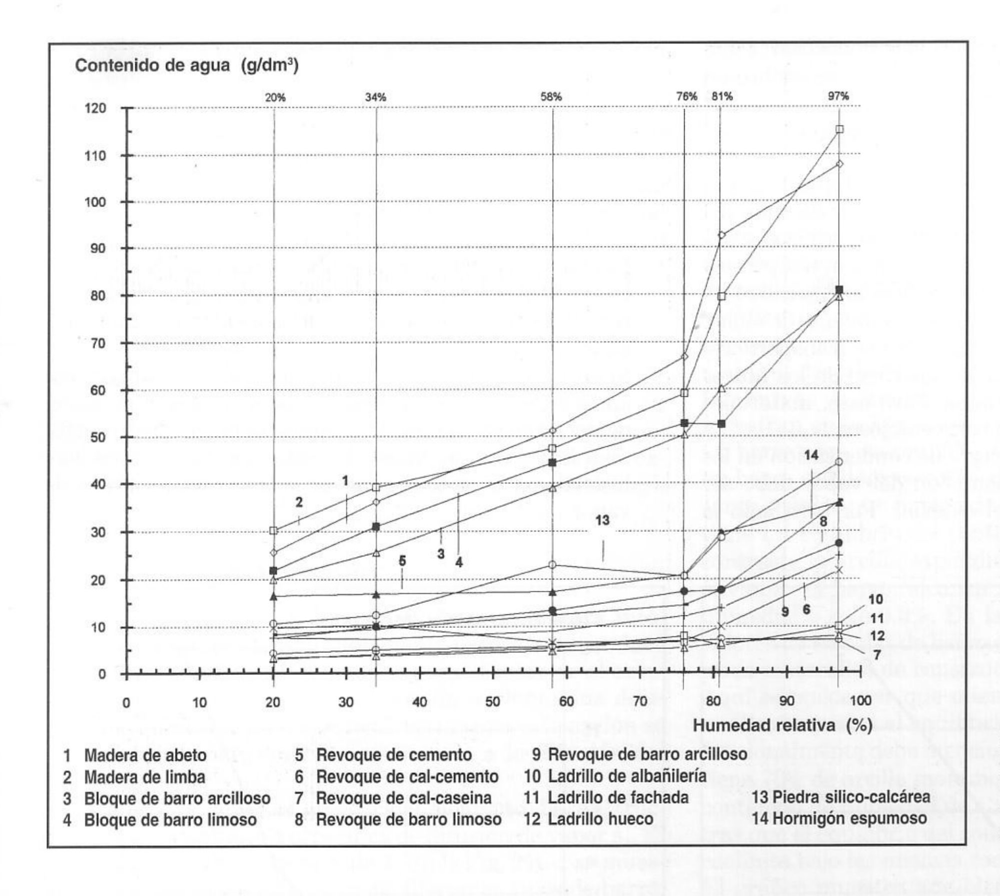
En zonas climáticas templadas y frías el vapor de agua del aire interior se difunde a través de los muros hacia el exterior. Si el aire se enfría en los muros y alcanza la temperatura de condensación. Esta humedad reduce la capacidad de aislamiento térmico y puede provocar el crecimiento de moho. En ese caso es importante que la humedad se transporte rápido por la acción capilar hacia la superficie de los muros desde donde esta puede evaporarse. Para esto, materiales como barro con alta capilaridad son ventajosos.
Con el objetivo de reducir el peligro de condensación en los muros la resistencia a la transmisión del vapor debe ser mayor en el interior que en el exterior. Por otro lado la resistencia a la transferencia de calor debe ser mayor en el exterior que en el interior.
Aunque los principios anteriores serían normalmente suficientes para inhibir la formación de condensación en los muros, también es posible crear una barrera de vapor en el interior empleando pinturas o laminas.
Se debe mencionar sin embargo que las barreras de vapor tiene dos importantes desventajas:

- Las barreras de vapor no están nunca totalmente selladas en la practica, especialmente en las uniones de diferentes elementos donde condensaciones perjudiciales podrían ocurrir.
- Si en muros con secciones monolíticas el agua penetra en la estación lluviosa desde el exterior hacia el muro, posteriormente no puede evaporarse en el interior debido a la barrera de vapor. En este caso el muro retiene humedad por un lapso mayor que sin una barrera de vapor.





2.4-2 Curvas de absorción de barros masivos (izquierda) y alivianados (derecha)



2.4-3
Equilibrio del contenido de humedad de diferentes barros en relación a otros materiales de construcción

2.5 Influencia del calor

2.5.1 Generalidades

La idea común de que la tierra es un muy buen material para el aislamiento térmico no puede probarse. Un muro macizo de barro apisonado sin paja u otros agregados livianos tiene casi el mismo efecto aislante que un muro macizo de ladrillos cocidos. El volumen de aire alojado en los poros de un material y su humedad resultan relevantes para el efecto de aislamiento térmico. Mientras más ligero el material, mayor es su aislamiento térmico y mientras más húmedo el material menor es su efecto aislante.
El calor que transita a través de un material de construcción se define por el coeficiente u de transferencia de calor.

2.5.2 Conductividad térmica

La transferencia de calor de un material se caracteriza por su conductividad térmica λ [W/mK]. Este valor indica la cantidad de calor, medida en watts/ m² que penetra en un muro de 1 m de espesor a una diferencia de temperatura de 1°C.
En la Fig.2.5-1 se muestran los diferentes valores λ según varios autores la norma alemana DIN 4108 (1998). Los valores λ para el barro alivianado con una densidad menor a 600kg/ m³ están extrapolados pero no están verificados empíricamente. En el FEB un barro alivianado con paja, con una densidad de 750 kg/ m³ dio un valor l de 0.20 W/mK, mientras que un barro alivianado con arcilla expandida, con una densidad de 740 kg/ m³ dio un valor de 0.18 W/mK.

2.5.3 Calor específico

La cantidad de calor necesaria para calentar 1 kg de un material a 1 °C se denomina, calor específico c. El barro tiene un calor específico de 0.1 kJ/kgK que es igual a 0.24 kcal/kg°C.

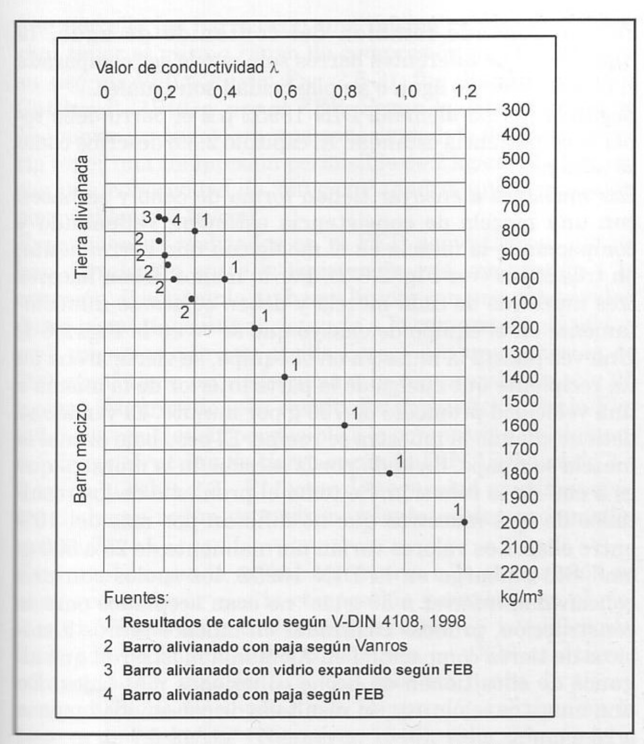
2.5.4 Capacidad térmica

La capacidad térmica (capacidad de almacenamiento de calor) S de un material se define como el producto del calor específico c y la densidad ρ:

$$S = c.\ \rho\ [kJ / m^3K]\ \text{o}\ [Wh / m^3K]$$

La capacidad térmica de calor define la cantidad de calor necesaria para calentar 1 m³ de material a 1°C. La capacidad de almacenamiento de calor Q_s para una unidad de área de un muro, es S multiplicada por el espesor s del elemento:

$$Q_s = c.\ \rho.\ s\ [kJ / m^2 K]\ \text{o}\ [Wh / m^2 K]$$



2.5-1 Resultados λ de cálculo según DIN 4108 (1998) y resultados λ de mediciones para barros alivianados

2.5.5 Pérdida y ganancia térmica

La velocidad en que un material absorbe y pierde calor se define por la difusión térmica b que es dependiente del calor específico c, la densidad ρ y la conductividad térmica λ.

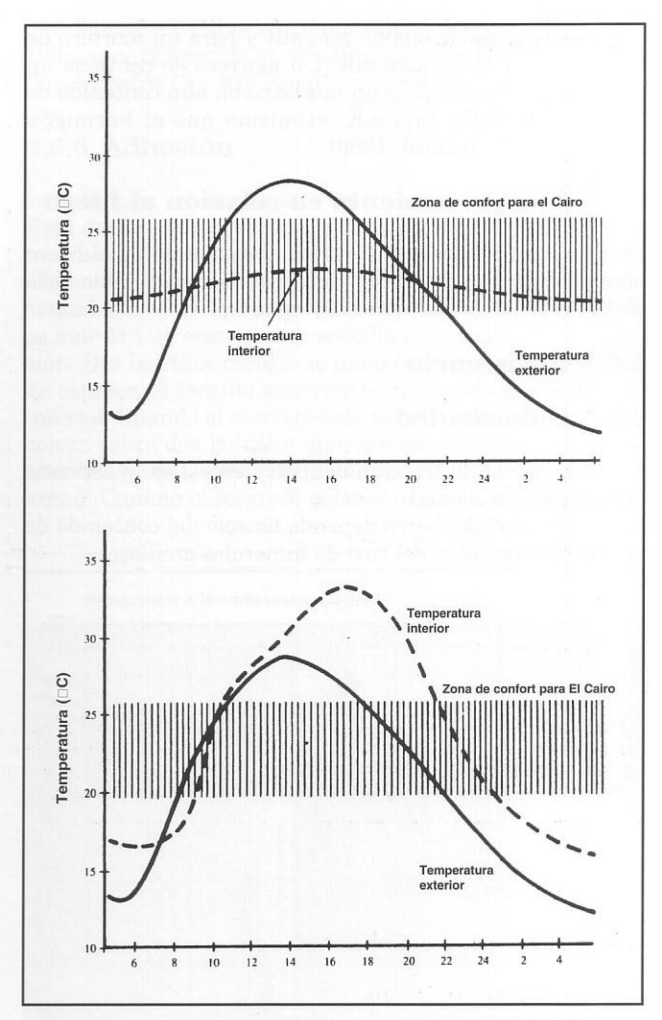
$$b = \sqrt{c \cdot \rho \cdot \lambda} \ [kJ / Km^2h^{0,5}]$$

Mientras mayor es el valor b más rápido penetra el calor.

2.5.6 Decrecimiento y retraso térmico

Un muro con una alta capacidad de almacenamiento crea un largo retraso de la penetración del calor y una disminución de la amplitud térmica, mientras que un muro con un alto aislamiento térmico solamente reduce la amplitud de la térmica.

En un clima con días calientes y noches frías en el que la temperatura promedio está dentro del nivel de confort (usualmente entre 17° y 25°C), la capacidad térmica es muy importante para crear un clima interior confortable. En la Fig. 2.5-2 el efecto del material y de la forma de una edificación en relación al clima interior se muestran de acuerdo a datos tomados en dos construcciones experimentales del mismo volumen construidas en Cairo, Egipto en 1964. Una se construyo con muros de barro apisonado de 50 cm de espesor y con bóvedas de bloques de barro y la otra con elementos de hormigón prefabricado de 10 cm de espesor y con un techo plano. Cuando la variación diurna



2.5-2 Comparación de temperaturas interiores y exteriores de una construcción con bóvedas de adobe (arriba) en relación a una construida con elementos prefabricados de hormigón (abajo) (Fathy, 1986)

de la temperatura exterior era de 13°C, la temperatura interior en la vivienda de tierra solo variaba 4°C, mientras que en la vivienda de hormigón la variación era de 16°C.

Es decir que la amplitud era cuatro veces mayor en la vivienda de hormigón en comparación a la vivienda de tierra. En la vivienda de hormigón la temperatura interior era 5°C superior que en el exterior a las 4pm, mientras que en el interior de la vivienda de tierra era 5°C más baja que en el exterior a la misma hora (Fathy 1986).

2.5.7 Expansión térmica

La expansión de un material provocada por el incremento de su temperatura es relevante si los materiales del muro y el revoque son distintos. El coeficiente de expansión lineal medido por el FEB para un barro con un alto contenido de agregados gruesos es de 0.0043 a 0.0052 mm/mK, para blo-

ques de barro es de 0.0062 mm/mK y para un mortero de barro arenoso 0.007 mm/mK. Un mortero de cal tiene un valor de 0.005 mm/mK y un mortero con alto contenido de cemento de 0.010 mm/mK, el mismo que el hormigón (Knöfel, 1979 y Künzel, 1990).

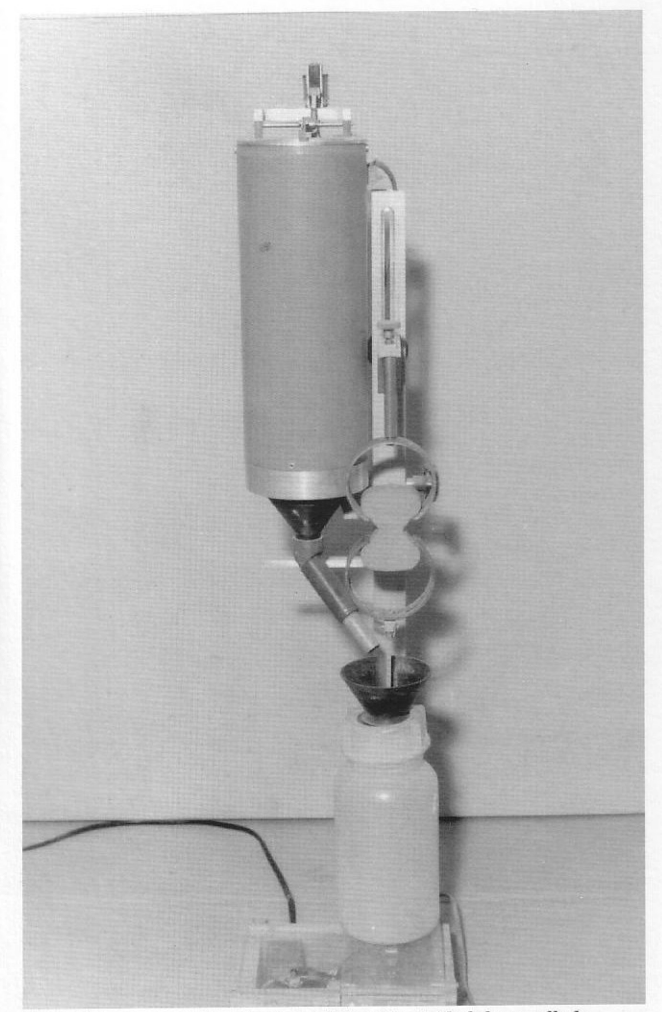
2.5.8 Comportamiento en relación al fuego

En la norma alemana DIN 4102, parte 1 (1977), el barro aún si contiene paja no es considerado combustible si la densidad no es menor que 1700 kg/m³.

2.6 Resistencia

2.6.1 Cohesividad

La resistencia a la tracción del barro en estado plástico se denomina cohesividad.
La cohesividad del barro depende no solo del contenido de arcilla sino también del tipo de minerales arcillosos.

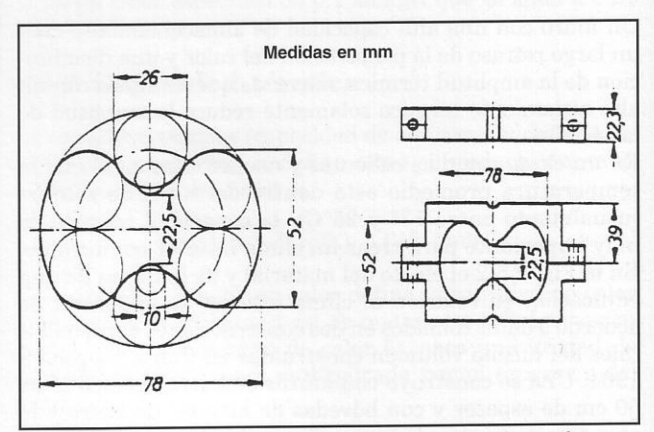


2.6-1 Equipo de ensayo para medir la cohesividad desarrollado en el FEB

Ya que depende también del contenido de agua, la cohesividad de diferentes barros solo puede ser comparada si el contenido de agua o su plasticidad son iguales.
Según la norma alemana DIN 18952 p.2 el barro debe tener la consistencia estándar. El capitulo 2.3.3 describe como se obtiene.
Las muestras a ensayar tienen forma de ocho y se hacen con una mezcla de consistencia estándar, rellenando y compactando la mezcla en el molde con una herramienta, en tres capas (ver Fig. 2.6-2). Por lo menos deben hacerse tres muestras de cada mezcla y deben colocarse inmediatamente en el equipo de ensayo que se ve en la Fig. 2.6-1. Una vez puesta la muestra en el equipo, se vierte arena en un recipiente que cuelga de la parte inferior de la misma a una velocidad promedio de 750 g por minuto. El vertido se detiene cuando la muestra se rompe. El peso bajo el cual la mezcla se rompe, dividido por la sección de la muestra que es 5 cm² da la cohesión. Se toma el promedio de los resultados de tres muestras que no difieran por más del 10% entre ellas. Los valores varían normalmente de 25 a 500 g/cm². Sin embargo en la DIN 18952, los suelos con una cohesividad inferior a 50 g/cm² no eran aceptados para la construcción, pruebas realizadas en muchos muros históricos de tierra compactada en Alemania mostraron que algunos de ellos tienen de hecho cohesiones más bajas. En una muestra se obtuvo un resultado de cohesividad menor a 25 g/cm².

2.6.2 Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión de elementos de construcción secos hechos de tierra, como por ejemplo bloques de tierra y tierra compactada difiere generalmente de 5 a 50 kg/cm². Este depende no solo de la cantidad y tipo de arcilla sino también de la distribución granulométrica del limo, arena y agregados mayores así como del método de preparación y compactación.
Los métodos de tratamiento y los aditivos para incrementar la resistencia a la comprensión del barro se tratan en el capitulo 4.5. La opinión de Niemeyer (1946) que la resistencia a la compresión es proporcional a la cohesividad y



2.6-2 Molde de preparación muestras de ensayo para la prueba de cohesividad según la Norma Alemana DIN 18952

que por ello los barros con una misma cohesividad deberían tener el mismo rango de compresión permisible para su uso en edificios (ver Fig. 2.6-3), fue desaprobada por Gotthardt (1949) y por el FEB. Según la extrapolación de Niemeyer un barro con una cohesividad de 60 g/cm² debería tener una compresión permisible de 2 kg/cm² y un barro con una cohesividad de 360 g/cm² tendría una compresión permisible de 5 kg/cm².
Experimentos realizados en el FEB demostraron que no hay correlación entre la resistencia a la compresión y la cohesión. Por ejemplo un barro limoso con una cohesividad de 80 g/cm² tiene una resistencia a la compresión de 66 kg/cm², mientras que una arcilla limosa con una cohesión de 390 g/cm² tiene un resistencia a la compresión de sólo 25 kg/cm². Algunos de esos resultados se muestran en la Fig. 2.6-3. La resistencia permisible a la compresión en elementos de construcción de tierra según la DIN 18954 es de 3 a 5 kg/cm² (Tabla 2.3). El factor de seguridad en componentes de barro según este razonamiento es de aproximadamente 7.
Esto implica que la actual resistencia a la compresión es siete veces mayor que la compresión permitida en el elemento. Viendo las actuales compresiones en la edificación ilustrada en la Fig. 1.2-9 construida en 1828 con tierra compactada y aún en uso, tenemos un muro de tierra compactada de cinco pisos y la compresión máxima en la base es de 7.5 kg/cm² (Niemeyer, 1946), valor que no sería permitido por la DIN 18954. En Yemen existen ejemplos de viviendas de muros macizos de tierra de hasta el doble de la altura del ejemplo mencionado anteriormente. Obviamente es posible construir un edificio de tierra de 10 pisos pero la DIN 18954 solo permite dos.
De acuerdo con las Normas Hindúes para bloques de suelo estabilizado la resistencia a la compresión húmeda del bloque debe ser también ensayada. Para esto el bloque debe sumergirse en agua a una profundidad de 3 mm durante 24 horas.

2.6.3 Resistencia a la tracción

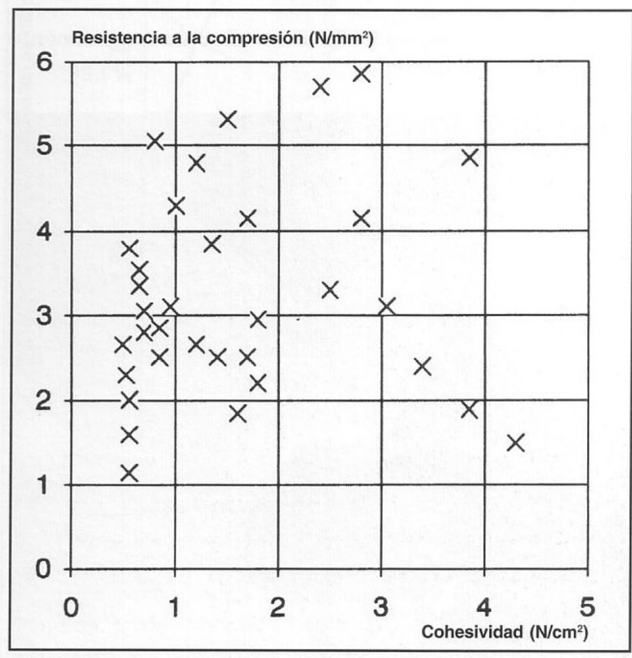
La resistencia del barro a la tracción en estado plástico se describió en la sección 2.6.1.
Para la construcción con tierra la resistencia a la tracción del material seco, no es relevante debido a que las estructuras de tierra no deben someterse a la tracción.

2.6.4 Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión del barro en estado seco es de poca importancia para la construcción con tierra. Sin embargo cuando se trata de establecer la calidad del mortero de barro y la rigidez de los bordes de los bloques de barro esto tiene cierta importancia.
La resistencia a la flexión depende fundamentalmente del contenido de arcilla y del tipo de minerales de arcilla. La arcilla montmorilonita tiene una resistencia a la flexión mucho más alta que la arcilla caolinita. El valor más bajo, investigado por Hofmann, Schembra et al. (1967) con caolinita alcanzó 1.7 kg/cm², el mayor con montmorilonita 223 kg/cm². Arcillas sin montmorilonita estudiadas por Hofmann, Schembra et al. (1967) dieron resistencias a la flexión entre 17 y 918 N/cm²

2.6.5 Adhesión

La adhesión es importante solo para morteros de barro. Esta depende de la aspereza de la superficie y de la resistencia a la flexión del mortero. Mientras que la Norma Alemana DIN 18555, parte 6, ofrece un método de ensayo estándar muy complejo para estudiar esto, en la Fig. 2.6-4, se muestra un ensayo muy sencillo para controlar la adhesión. Dos ladrillos cocidos se unen con un mortero de 2 cm de espesor, el ladrillo superior se coloca oblicuo a 90° del inferior. Cuando el mortero está seco el ladrillo superior se coloca sobre dos ladrillos apoyado en sus extremos mientras que el inferior es cargado con un recipiente lleno de arena. Cuando el mortero colapsa el peso del ladrillo infe-



2.6-3 Relación de la cohesividad y la resistencia a la compresión de varios ensayos según Gotthardt, 1949 y ensayos en el FEB

Tabla 2.3 Compresiones permisibles en barros de acuerdo a la Norma Alemana DIN 18954

Peso específico kg/m³	Resistencia a la compresión kg/cm²	Valores permisibles en kg/cm² Muro	Columna altura/espesor 11	12	13	14	15
1600	20	3	3	2	1		
1900	30	4	4	3	2	1	
2200	40	5	5	4	3	2	1

rior más el de la arena se divide por el área del mortero dando así la resistencia a la adhesión. Sin embargo esto es relevante solo si ocurre una falla en la unión del mortero y el ladrillo. Si la falla ocurre dentro del mortero entonces significa que la resistencia a tracción del mortero es menor que la de la adhesión.

2.6.6 Resistencia a la abrasión

Las superficies de barro empleadas como revoques y pisos son sensibles a la abrasión. En el FEB se construyo un aparato con el cual se puede medir la resistencia a la abrasión, ver Fig. 2.6-5.
El aparato consiste en un cepillo rotatorio que con una presión de 2kg se mantiene contra la superficie del mortero, después de veinte vueltas se pesa el material desprendido por este.

2.6.7 Módulo de elasticidad

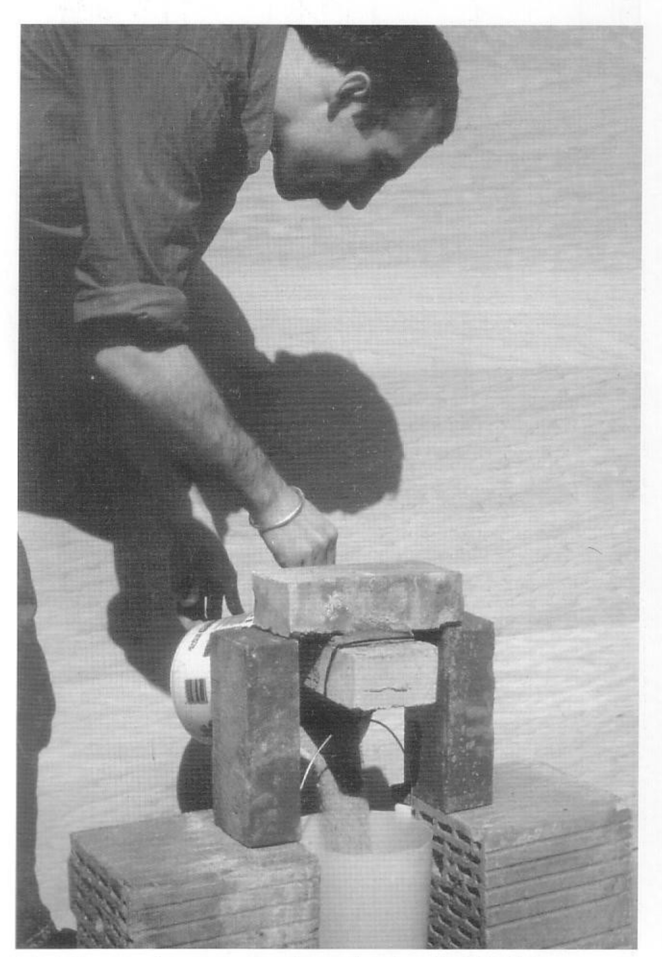
El módulo de elasticidad del barro fluctúa normalmente entre 600 y 700 kg/mm^2.

2.7 Valor pH

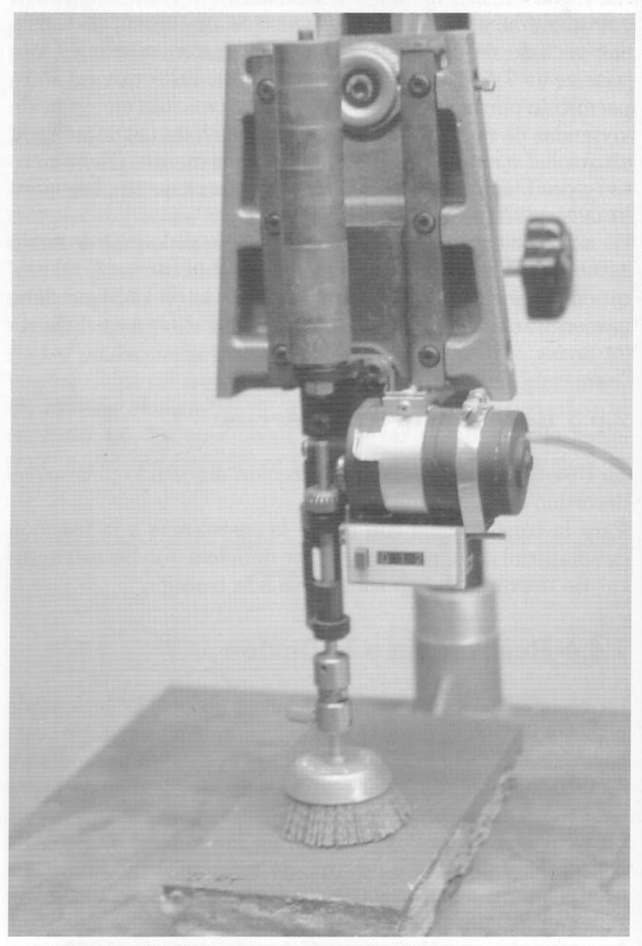
Los suelos arcillosos tienen usualmente un valor pH entre 7 y 8.5. En nuestros días, si el barro se extrae de zonas industriales puede ser ácido si se extrae de las capas superiores debido a lluvia ácida. Un ph de más de 7 usualmente previene el crecimiento de hongos. (el valor ph favorable para el crecimiento de hongos varía usualmente entre 6.5 y 4.5).

2.8 Radiactividad

Mediciones de radiación de rayos beta y gamma mostraron que el barro tiene valores que no son más altos que los del hormigón y de los ladrillos cocidos. Por el contrario, algunos ladrillos ensayados por el autor exhibieron más radiación, probablemente debido a aditivos como cenizas volantes o escorias de hornos donde se produce hierro. Mucho más importantes que los rayos beta y gamma son los rayos alpha irradiados por el gas radiactivo radón, estos rayos no pueden penetrar el cuerpo humano pues la piel los absorbe, pero pueden ser inhalados al respirar y pueden provocar cáncer de los pulmones.



2.6-4 Ensayos de campo para determinar la cohesividad de un mortero de barro



2.6-5 Aparato del FEB para testear la abrasión

2.9 Protección a ondas electromagnéticas de alta frecuencia

Las investigaciones sobre bloqueo o protección que ofrecen los materiales de construcción a las ondas electromagnéticas de alta frecuencia (celulares, microondas, teléfonos inalámbricos) llevadas a cabo por la Universidad de Bundeswehr en Munich, Alemania dieron como resultado que un muro de adobes con 24cm de espesor de 1600 kg/m³ de densidad y 15% de huecos con aire en su interior, expuesto a una frecuencia del rango de 1,8 a 1,9 GHz de microondas de un teléfono celular o inalámbrico amortigua las ondas en 22dB equivalente a una reducción de 99.4% mientras que un muro del mismo espesor de ladrillos livianos de 1200 kg/m³ solo reduce las frecuencias en 17dB y un muro de ladrillos más compacto de 1800 kg/m³ solo 7dB, ver Fig. 2.9-1.

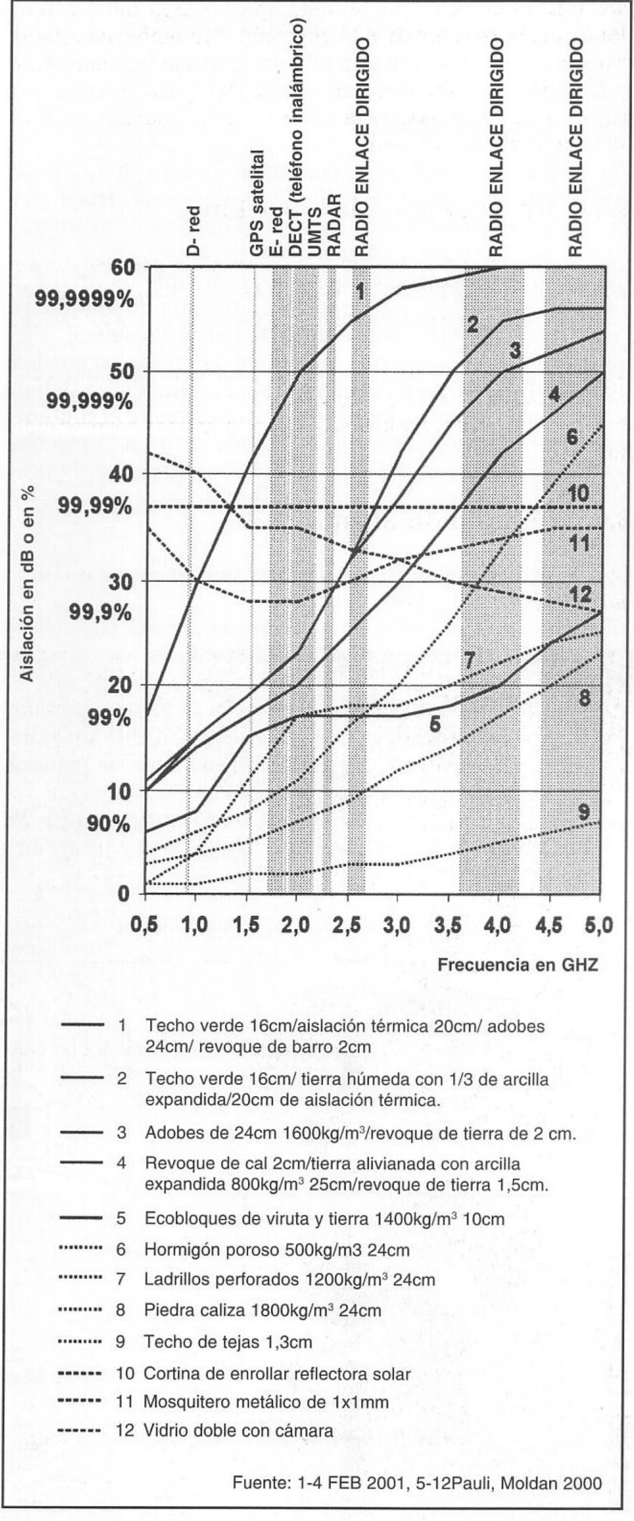
Para frecuencias más altas como pueden ser las de radioaficionado 11cm (2.32-2.45 Ghz) o antenas direccionales (4.4-5.0 GHz) los valores se encuentran en un rango mucho mayor como se ve en la figura.

Para 4GHz la resistencia al pasaje de las ondas en un muro de tierra es de 50dB (=99,999 %), en contraposición a un muro de ladrillos que solo aísla 17dB.

Un muro convencional de los sistemas constructivos livianos como se encuentran en muchas construcciones prefabricadas actuales no ofrece en contraposición casi ninguna protección.

Un techo verde sobre cúpula de adobes de 24 cm. ofrece en el campo de 2GHz una muy buena protección de 49 dB = 99,999%. Un techo de tejas e contraposición alcanza solo una protección mínima mientras que un techo verde liviano con 16cm de espesor alcanza bajo una exposición de 2GHz, 22 dB lo que equivale a 99,4% de protección.

Las ventanas pueden ofrecer buena protección sólo si tienen doble vidrio y una lamina de metal noble adherida al vidrio térmico o una maya metálica de mosquitero como muestra la Fig. 2.9-1.



2.9-1 HF resistencia a la transmisión bajo MIL-Estándar 285 de ondas polarizadas verticales.

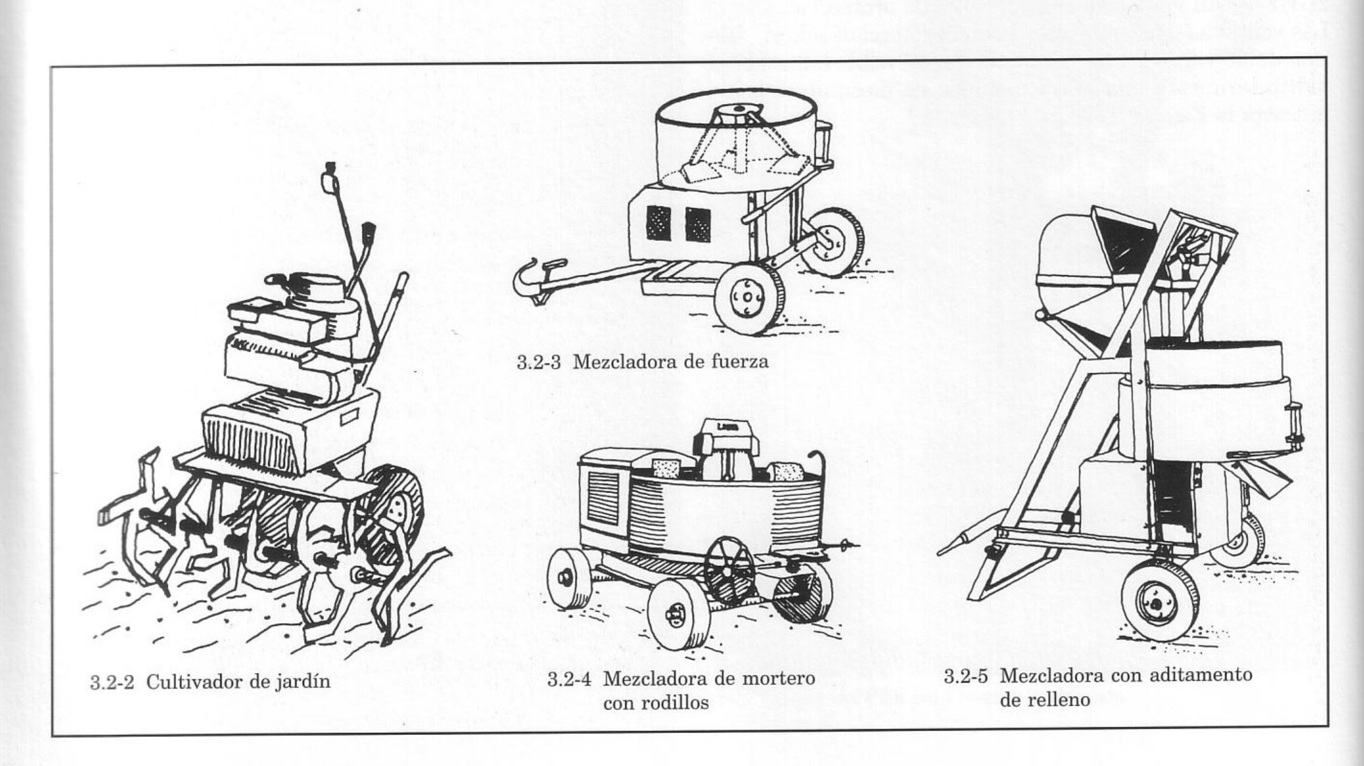
3. Preparación del barro

3.1 Generalidades

Obtener un material de construcción a partir de un suelo arcilloso no es siempre sencillo y requiere experiencia. La mezcla adecuada depende del tipo de suelo, de su consistencia y de la aplicación que se le quiera dar.
Un suelo húmedo suelto con bajo contenido de arcilla y alto contenido de arena puede ser utilizado directamente para la construcción de un muro de tierra apisonada.
Terrones de tierra con alto contenido de arcilla no pueden utilizarse como material de construcción. Estos deben triturarse o disolverse en agua y posteriormente el contenido de arcilla debe rebajarse agregando arena a la mezcla.
Este capitulo describe las diferentes posibilidades de preparar la tierra para aplicaciones específicas.

3.2 Humedecimiento, trituración y mezcla

Hay diferentes métodos que pueden emplearse para obtener un material de construcción trabajable y sin terrones de tierra.
Uno de los métodos más sencillos para reducir el tamaño de los terrones y hacer su consistencia trabajable sin utilizar esfuerzo mecánico, es sumergirlos en agua de manera que obtengan plasticidad por si mismos.
Para lograrlo, los terrones se colocan en capas de 15 a 25 cm de espesor sobre grandes depósitos planos y posteriormente se cubren con agua.
Luego de 2 a 4 días se obtiene una masa blanda que puede ser moldeada y mezclada con agregados como arena y grava, a mano, con los pies o mecánicamente.
En climas fríos en los que hay heladas, se emplea un método tradicional que consiste en amontonar la mezcla de barro en un cúmulo de 20 a 40 cm de altura, que se deja congelar durante el invierno para que la desintegración sea provocada por la expansión del agua congelada.
La forma más sencilla de preparar la mezcla adecuadamente, es removiendo el barro humedecido con un azadón o amasando la mezcla con los pies. También se pueden utilizar animales para este trabajo. La paja, la barcia, la arena y otros aditivos pueden ser también mezclados con la misma operación.
En el Laboratorio de Investigaciones para Construcciones Experimentales FEB de la Universidad de Kassel, Alemania se construyó una rueda de molienda muy efectiva (Fig. 3.2-1), dos pares de llantas viejas de tractor se rellenaron con hormigón y se utilizaron para preparar la mezcla. Las llantas se montaron en los extremos de un eje horizontal fijado a un poste vertical central y para moverlas se utilizó un tractor, puede utilizarse también fuerza animal o fuerza manual.
Con una correcta adición de agua, se produjo un metro cúbico de barro en 15 minutos (con ayuda de 2 a 3 personas, que fundamentalmente paleaban hacia el depósito, el barro que se derramaba en el proceso). Si se dispone de un tractor es muy sencillo y también más efectivo dispersar la tierra sobre un superficie del terreno y triturar la mezcla



3.2-3 Mezcladora de fuerza

3.2-2 Cultivador de jardín

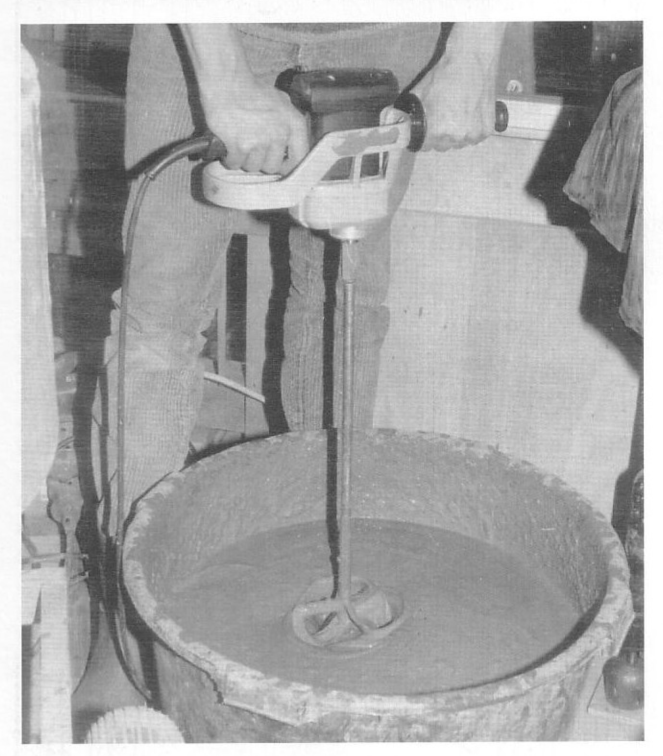
3.2-4 Mezcladora de mortero con rodillos

3.2-5 Mezcladora con aditamento de relleno



3.2-1 Mezcladora utilizada en el FEB, Kassel







varias veces con las ruedas. Para pequeñas cantidades es muy útil un pequeño cultivador de jardín (Fig. 3.2-2). En la tecnología moderna de construcción con tierra se emplean mezcladores de fuerza. En la Fig. 3.2-3, la mezcla se prepara con ayuda de paletas mezcladores que se fijan a un eje vertical o a uno horizontal (Fig. 3.2-5). Es conveniente tener un aditamento mecánico para llenar la mezcladora, como se observa en la Fig. 3.2-5.

Las viejas máquinas mezcladoras de mortero, como la de rodillos rotatorios pueden utilizarse también (Fig. 3.2-4). La máquina en la Fig. 3.2-5 fue especialmente desarrollada para preparar barro a partir de cualquier tipo de tierra (firma Heuser, Höhr-Grenzhausen).

Un método más rápido para preparar barro a partir de terrones secos de tierra arcillosa es triturándolos en una máquina (Fig. 3.2-8). Esta máquina tiene angulares de acero fijados a una plancha horizontal que rota a una velocidad de 1440 rotaciones por minuto y necesita un motor eléctrico de 4 kW.

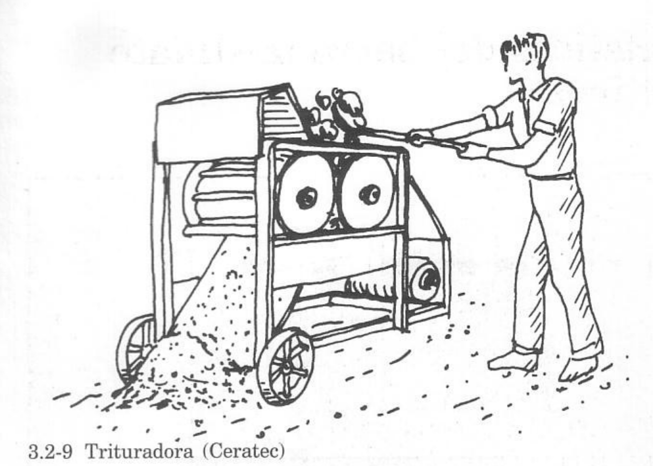
La máquina no funciona si los terrones están húmedos. Se puede observar otro ejemplo en la Fig. 3.2-9, este equipo fue construido por Ceratec, Bélgica, y está en condiciones de triturar hasta 20m³ de terrones en 8 horas con un motor de 3 caballos de fuerza. En esta máquina los terrones son triturados por dos cilindros que giran en sentido inverso. La máquina que se muestra en la Fig. 3.2-10 de la firma Royer, Francia puede triturar hasta 30m³ de terrones de tierra en 8 horas.

Para sacar la mezcla de la máquina hay varias posibilidades. La máquina que se muestra en la Fig. 3.2-3 tiene una abertura en la parte inferior a través de la cual la mezcla se puede vaciar automáticamente en una carretilla, el contenedor del equipo que se muestra en la Fig. 3.2-6 puede ser volteado para la mezcla caiga en el contenedor plano que tiene debajo. Las mezcladoras comunes de hormigón donde solo el tambor gira no son adecuadas para preparar

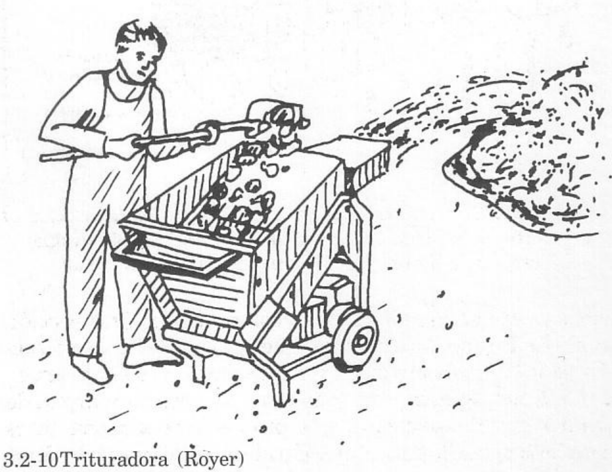
3.2-6 Mezcladora de fuerza (Heuser)

3.2-7 Mezcladora eléctrica pequeña de uso manual

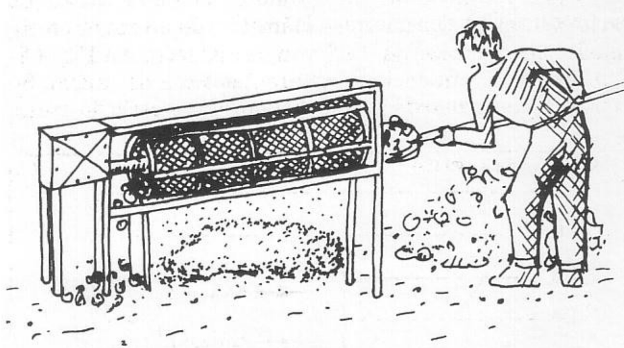
3.2-8 Trituradora eléctrica (Erdwolf)



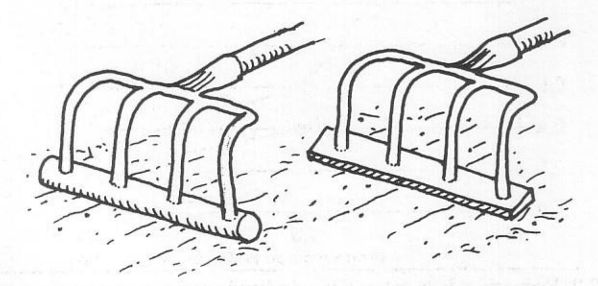
3.2-9 Trituradora (Ceratec)



3.2-10Trituradora (Royer)



3.3-1 Equipo mecánico para tamizado



3.4-1 Rastrillos especiales para preparar lechadas de barro

mezclas de barro debido a que en estas mezcladoras se aglomeran los terrones en vez de triturarse. Una mezcladora eléctrica manual del tipo que se muestra en la Fig. 3.2-7 consume demasiado tiempo y se recomienda solo para preparar pequeñas cantidades de mortero o revoque.

3.3 Tamizado

Para técnicas de construcción específicas se debería tamizar la tierra para extraer las partículas mayores. El método más simple es hacer pasar la tierra seca a través de un tamiz. El equipo mecánico, con un tamiz cilíndrico inclinado, que se hace girar manualmente o con un motor es más efectivo (Fig. 3.3-1).

3.4 Disolver barro

Con el objetivo de enriquecer un suelo arenoso con arcilla o preparar un barro alivianado, generalmente es necesario hacer una lechada, que se prepara disolviendo el barro. Esta se puede preparar fácilmente de un polvo de barro seco mezclado con agua. Si se fueran a utilizar terrones de suelo arcilloso, se deben dejar remojar por algunos días, cubiertos con agua en contenedores bajos y planos. Después se puede obtiene obtener la lechada utilizando rastrillos especiales como se muestra en la Fig. 3.4-1, o utilizando mezcladoras eléctricas manuales, como se muestra en la Fig. 3.2-7. Una mezcladora de fuerza comúnmente utilizada para mezclar y aplicar revoque es más efectiva.

3.5 Curado

Mauken es el termino alemán utilizado para denominar un tipo de curado en el cual la mezcla de barro se deja reposar durante 12 a 48 horas. La experiencia ha demostrado que la cohesión del barro incrementa mediante este proceso. Este fenómeno es probablemente debido a la atracción electroquímica entre los diferentes minerales arcillosos que los fuerza a adoptar una estructura más compacta y ordenada.

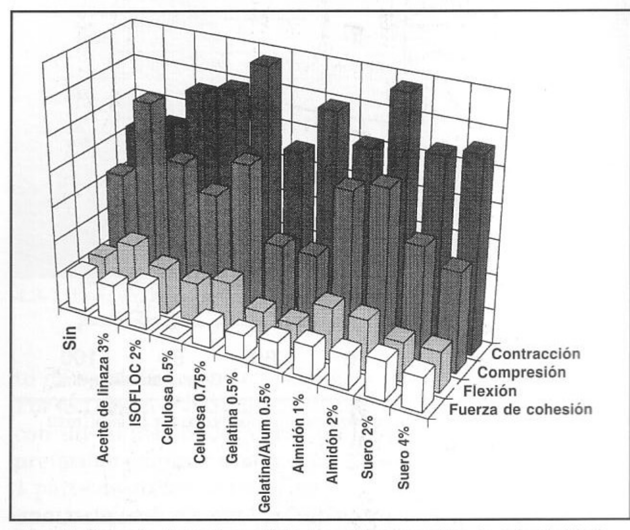
3.6 Reducción del contenido de arcilla o rebajado

El barro se debe rebajar si es muy rico en arcilla. Agregados gruesos como la arena y la grava se añaden, incrementando la resistencia del barro a compresión. Los agregados deben siempre humedecerse antes de ser añadidos a la mezcla.
Además de arena y guijarro o canto rodado, se puede utilizar también pelos, estiércol de vaca, brezo, paja, cáscaras, aserrín y otros materiales similares. Y sirven asimismo para reducir la retracción, algunos de ellos sirven incluso para incrementar el aislamiento térmico.

4. Mejoramiento de las características del barro mediante tratamientos especiales y aditivos

4.1 Generalidades

Solamente para aplicaciones específicas es necesario modificar las características del barro.
Aditivos que mejoran algunas propiedades pueden empeorar otras como se puede observar en la Fig. 4.1-1. Por ejemplo la resistencia a la compresión y tracción pueden incrementarse empleando almidón y celulosa, pero esos aditivos al mismo tiempo reducen la cohesión y aumentan la retracción, lo cual resulta desventajoso.



4.1-1 Influencia de varios aditivos en la retracción, la cohesividad, la tracción en flexión y la compresión de un barro arenoso

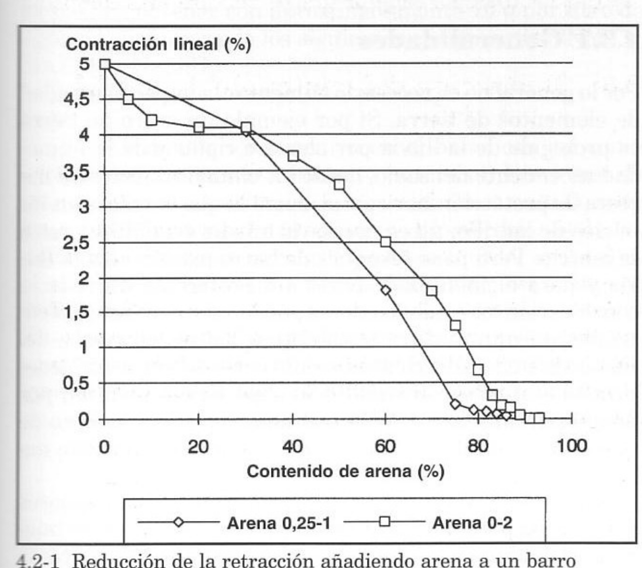
4.2 Reducción de las fisuras provocadas por la retracción

4.2.1 Generalidades

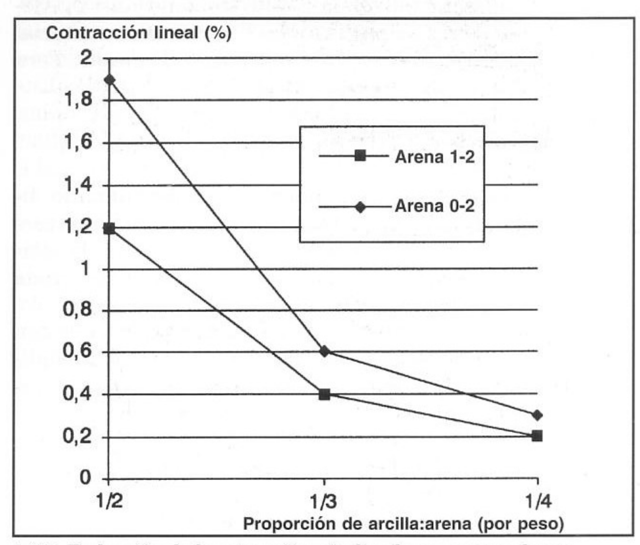
Las fisuras de retracción en superficies de barro expuestas a la lluvia deben evitarse debido a la creciente erosión. La retracción durante el secado depende del contenido de agua, del tipo y cantidad de minerales arcillosos y de la distribución granulométrica de los agregados como se describe en la sección 2.3.3.

4.2.2 Rebajado con agregados

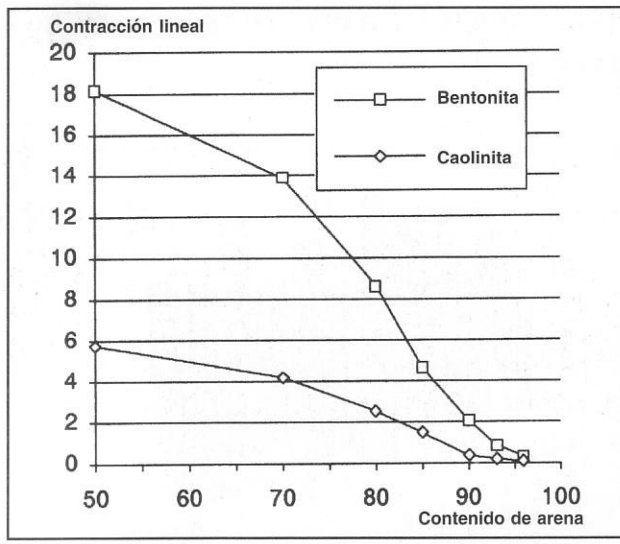
Añadiendo arena u agregados mayores a un barro, se reduce el contenido relativo de arcilla y por lo tanto se reduce el promedio de retracción al secar. En las Figs. 4.2-1 y 4.2-2 se muestran los resultados de este método. En la Fig. 4.2-1 un barro con 50% de arcilla y 50% de limo se mezcló con arena, aumentando gradualmente la cantidad de la misma hasta que el promedio de la retracción se acercara a cero (todas las muestras examinadas tenían una consistencia estándar para poder ser comparables) (ver sección 2.3.3). Es interesante señalar que un promedio de retracción de 0,1% se alcanza con un contenido de 90% de arena de 0 a 2 mm de diámetro, mientras que con una arena de 0,25 a 1 mm de diámetro, este promedio se alcanza antes de un 80% aproximadamente. Un efecto similar puede verse en la Fig. 4.2-2 con un barro limoso, donde la adición de arena gruesa (de 1 a 2 mm de diámetro) da un mejor efecto que la arena normal de 0 a 2 mm de diámetro. La Fig. 4.2-3 muestra la influencia de diferentes tipos de arcilla. Se redujo el contenido de arcilla de la primera serie de mues-



4.2-1 Reducción de la retracción añadiendo arena a un barro arcilloso



4.2-2 Reducción de la retracción añadiendo arena a un barro limoso



4.2-3 Reducción de la retracción, añadiendo arena a la caolinita y a la bentonita

tras con partículas de arena de 0 a 2 mm de diámetro mezcladas con 90 a 95% de caolinita pura, la otra serie se rebajó con bentonita, constituida por 71% de montmorillonita y 16% de illita.

4.2.3 Rebajado con líquidos

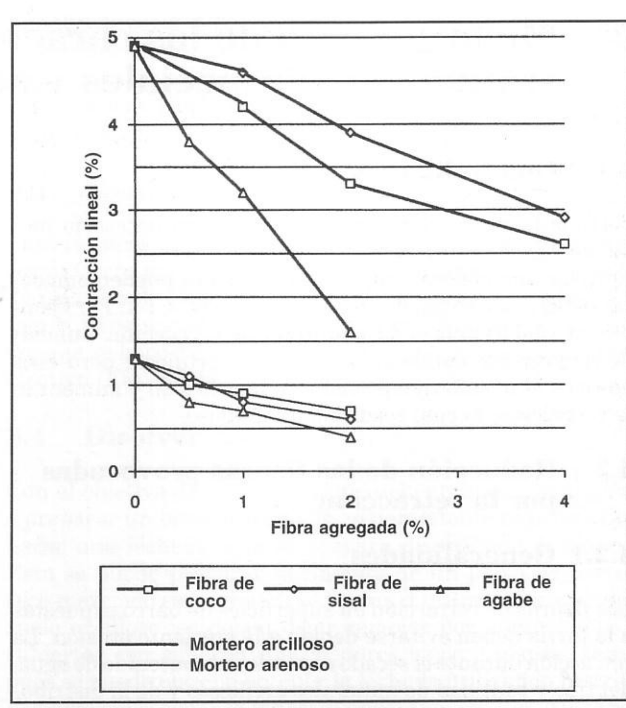
En la industria de la cerámica, los medios de rebajado con líquidos se emplean para obtener una mayor liquidez y así emplear menor cantidad de agua (con el objetivo de reducir la retracción). Los medios de rebajado más comunes son con silicato de sodio ($Na_2O \cdot 3\text{-}4SiO_2$), carbonato de sodio ($Na_2CO_3$), ácido de humus y ácido tánico. Ensayos realizados por el "Forschungslabor für experimentelles Bauen" (FEB) (Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales), de la Universidad de Kassel, Alemania, mostraron que para emplear tierra como material de construcción estos métodos son poco relevantes. Pero los ensayos con suero fueron exitosos.

4.2.4 Adición de fibras

Cuando se añaden fibras como pelo animal o humano, fibras de coco, sisal, agabe, bambú, y paja cortada la retracción puede reducirse. Esto se debe a que el contenido relativo de arcilla se reduce y que parte del agua es absorbida por los poros de las fibras.
También se reduce la aparición de fisuras debido a que con las fibras se incrementa la cohesividad de la mezcla. Algunos resultados de los ensayos realizados por el FEB se muestran en Fig. 4.2-4.

4.2.5 Medidas estructurales

El método más simple para reducir las fisuras por retracción en elementos de tierra es reducir sus dimensiones e incrementar el tiempo de secado. Durante la producción



4.2-4 Reducción de la retracción de morteros de barro con adición de fibras

de bloques de barro, es por ejemplo importante voltearlos verticalmente y protegerlos del asoleamiento y la brisa directos con el objetivo de garantizar un proceso de secado homogéneo y lento.
Otro método inteligente es diseñar juntas de retracción evitando así fisuras de retracción en el elemento. Estas juntas pueden posteriormente sellarse por separado (ver sección 5.6.1, 8.4 y 14.4.3).

4.3 Estabilización contra el agua

4.3.1 Generalidades

Por lo general no es necesario aumentar la impermeabilidad de elementos de tierra. Si por ejemplo un muro de tierra es protegido de la lluvia por aleros o ripias y de la humedad ascendente del suelo, desde los cimientos, con una barrera de protección horizontal, como la que se coloca en los muros de ladrillo, no es necesario añadir estabilizadores a la mezcla. Pero para revoques de barro expuestos a la lluvia y para elementos de barro sin protección durante la construcción los estabilizadores pueden ser necesarios. Teóricamente una pintura resistente a las inclemencias del tiempo es una protección suficiente pero en la práctica generalmente aparecen fisuras en la superficie o se crean por una acción mecánica. Adicionalmente, existe el peligro de que el agua de lluvia penetre en el barro provocando expansión y luego erosión.
Se dice que el cemento y el bitumen como estabilizadores son buenos para barros con poca arcilla y que la cal es buena para barros arcillosos. Sin embargo, esta regla no toma en consideración el tipo de arcilla. Por ejemplo la arcilla

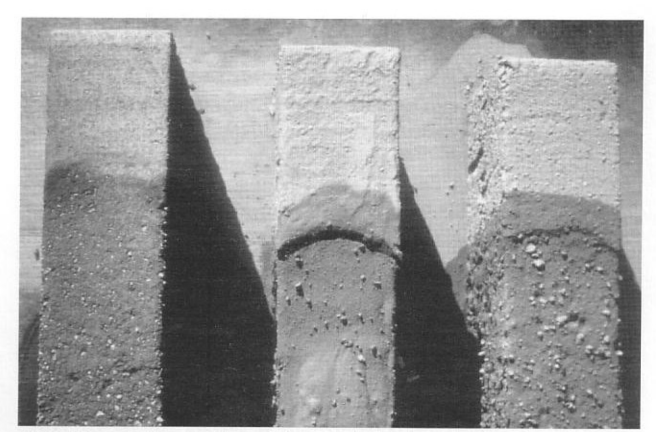
montmorillonita y la caolinita reaccionan de distinta manera como se describe en la sección 4.5.5.
Los estabilizadores cubren los minerales de arcilla y previenen que el agua los alcance y provoque expansión. En este capitulo se describen estabilizadores comunes empleados tradicionalmente y hoy en día. Otros estabilizadores que incrementan la resistencia a la compresión se mencionan en la sección 4.5.5. y 4.5.6. La impermeabilidad se puede incrementar modificando la distribución granulométrica del limo y arena como fue demostrado por, con tres bloques de barro que se ven en la Fig. 4.3-1, en los que se vertieron 10 litros de agua por un lapso de 2 minutos. El adobe del centro con alto contenido de limo presentó una erosión extrema de 5 mm de profundidad. El adobe de la derecha con un contenido mayor de arcilla aproximadamente 30% presentó una erosión de 3 mm y el adobe de la izquierda con el mismo contenido de arcilla, pero con menos arena fina y más arena gruesa, mostró una ínfima erosión.

4.3.2 Estabilizadores minerales

Cemento
El cemento actúa como estabilizador contra el agua en suelos con bajo contenido de arcilla. Mientras mayor el contenido de arcilla más cemento se necesita para alcanzar el mismo efecto de estabilización. El cemento interrumpe las fuerzas aglutinantes de la arcilla, haciendo posible que la resistencia a la compresión de un suelo estabilizado con cemento sea menor que la de un mismo suelo sin cemento como se muestra en la sección 4.5.5. Al igual que con hormigón la máxima resistencia de los bloques de suelo estabilizados con cemento se alcanza a los 28 días. Estos bloques deben ser curados como mínimo 7 días y no deben secarse demasiado rápido. Si no están protegidos del sol y el viento directos los bloques deben ser rociados con agua durante el proceso de curado. Para acelerar y optimizar el proceso de curado se pueden añadir 20 a 40 g de hidróxido de sodio (NaOH) por cada litro de agua. Efectos similares se pueden obtener con aproximadamente 10 g por litro de agua de cualquiera de los siguientes componentes: $NaSO_4$, Na_2CO_3 y Na_2SiO_2.

Cal
El intercambio de iones ocurre en el barro con cal como estabilizador si existe suficiente humedad. Los iones de calcio de la cal se intercambian con los iones metálicos de la arcilla. Como resultado, ocurren aglomeraciones de las partículas finas que evitan la penetración del agua. Asimismo, La cal reacciona además con el CO_2 del aire para formar caliza.
El contenido óptimo de cal del barro difiere y debe ser investigado en detalle en cada caso. En la sección 4.5 se muestra que si sólo se añade una pequeña cantidad de cal la resistencia a la compresión puede ser menor que la del barro sin estabilizar.

Bitumen
En Babilonia se empleo bitumen para estabilizar ladrillos de barro antes del siglo 5 a.C. Normalmente el bitumen es apropiado para barros con bajo contenido de arcilla. El efecto de estabilización se optimiza si la mezcla se compacta. Por esa razón el bitumen se disuelve primeramente en agua con un emulsionador como nafta, parafina o petróleo. Es preferible emplear una mezcla de 4 a 5 partes de bitumen, 1 parte de aceite de parafina y 1% de parafina calentada a una temperatura de 100°C. Normalmente de 3 a 6% de esta solución es suficiente para estabilizar el suelo. Después que se evapora el solvente y el agua, se forma una película que aglutina las partículas del barro, evitando la penetración del agua.



4.3-1 Ensayo de erosión en bloques de barro

Silicato de sodio
Silicato de sodio ($NaO_2 \cdot 3\text{-}4\ SiO_2$) es un buen estabilizador para barros arenosos, pero debe ser rebajado con agua en una proporción de 1:1 antes de añadirlo, de lo contrario aparecen micro fisuras que provocan una fuerte absorción de agua.

4.3.3 Productos animales

Productos animales como la sangre, orina, estiércol, caseína y cola animal han sido utilizadas durante siglos para estabilizar el barro. En la antigüedad, la sangre de toro se utilizó comúnmente como agente aglutinante y estabilizante. En Alemania la superficie de pisos de tierra apisonada se trataba con sangre de toro, volviéndola resistente a la abrasión y facilitando su limpieza. El suero y la orina se utilizan comúnmente en muchos países como estabilizador en superficies de barro. Si se emplea estiércol este debe dejarse reposar de 1 a 4 días para permitir la fermentación; el efecto de estabilización se incrementa considerablemente, debido al intercambio de iones entre los minerales de arcilla y el estiércol.
En la India los revoques tradicionales (revoque gobar) tienen un alto contenido de estiércol que se deja reposar por un día. Esta técnica se emplea hasta nuestros días. Por ejemplo investigaciones efectuadas en el FEB mostraron que una muestra de revoque de barro ensayada con la prueba de aspersión de chorros de agua (ver sección 2.3.7) se erosiona luego de cuatro minutos mientras que una muestra con 3,5% en peso de estiércol de vaca comenzó a mostrar signos de erosión después de 4 horas.

4.3.4 Productos animales y minerales

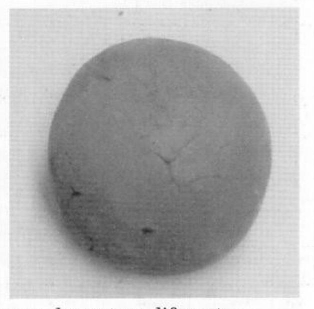
En la antigüedad, se aumentaba comúnmente la estabilidad contra el agua añadiendo cal y estiércol o cal y suero. Una receta tradicional por ejemplo especifica 1 parte de cal en polvo mezclada con 1 parte de barro arenoso y embebida en orina de caballo por 24 horas. Luego de este proceso, se puede emplear como revoque. Obviamente la cal reacciona químicamente con algunos ingredientes de la orina, pudiéndose observar la aparición de algunos cristales finos. La caseína en orina y el estiércol reaccionan con la cal formando albuminato de calcio (que no es soluble en agua). La celulosa en la orina y estiércol incrementan la resistencia a la flexión, al actuar las fibras de celulosa como refuerzo. Los componentes de amoníaco actúan como desinfectantes contra microorganismos. Otras dos recetas que fueron exitosamente ensayadas en el FEB son; a) una parte de cal hidráulica, cuatro partes de estiércol remojado y reposado por tres días y ocho partes de barro arenoso. b) cuatro partes de cal hidráulica, una parte de *quark* descremado y 10 partes de barro arenoso.

4.3.5 Productos vegetales

Savias de plantas aceitosas y con contenido de látex como sisal, agabe, banano y *euphorbia herea,* usualmente en combinación con cal han sido exitosamente utilizadas como pintura estabilizadora en muchos países. Investigaciones realizadas en el FEB mostraron que usando aceite de linaza doblemente cocido se obtiene una alta resistencia a las inclemencias del tiempo en superficies de barro. Sin embargo se debe mencionar que en este caso la difusión del vapor se reduce considerablemente (ver sección 2.4.4). Algunos informes muestran que el almidón cocido y las melazas pueden utilizarse para optimizar la estabilidad. Este efecto aumenta aún más si se añade también un poco de cal.

4.3.6 Estabilizadores sintéticos

Resinas sintéticas, parafinas, ceras sintéticas y látex sintéticos son muy conocidos por tener un efecto de estabilización sobre el barro. Sin embargo, así como los costos de estos materiales son más elevados, son también propensos a la degradación debida a los rayos ultravioleta y actúan también como barreras de vapor, estos materiales no se discutirán en detalle en este libro. Estos estabilizadores deben ensayarse antes de utilizarse.

4.4-1 Ensayo de la caída de la bola para demostrar diferentes cohesividades

Silane, siloxane, siliconas, silicio - éster y acrilatos son productos que poseen un efecto repelente al agua. Estos se tratan en detalle en la sección 12.4.

4.4 Incremento de la cohesión

4.4.1 Generalidades

La manera con la que se obtiene cohesión se describió anteriormente en la sección 2.6.1.
Normalmente, al utilizar barro como material de construcción no se requiere tener una cohesión específica. Pero si la cohesión no es suficiente se puede incrementar añadiendo arcilla y también con una mejor preparación, esto significa amasando y curando correctamente (ver sección 3.5).
Los productos minerales, animales y vegetales que normalmente se añaden para mejorar la resistencia a las inclemencias del tiempo, también sirven generalmente para incrementar la cohesividad aunque a veces la reducen. Esta sección explica varios métodos por los cuales se puede incrementar la cohesión.

4.4.2 Mezclado y curado

Es interesante señalar que diferentes muestras de barro de una misma mezcla pueden tener diferentes cohesividades dependiendo del método empleado en su preparación. Si la mezcla tiene suficiente agua para la preparación, entonces el amasado, mezclado y curado tienen un efecto positivo en el incremento de la cohesividad.
En el FEB se descubrió que un mortero de barro limoso luego de mezclarse durante 10 minutos en una mezcladora de laboratorio, alcanzó una cohesividad 57% superior que la misma muestra mezclada durante un minuto. Sin embargo se obtuvo una disminución del 11% luego de 20 minutos de mezclado indicando que existe un cierto tiempo de mezclado óptimo. El incremento de la cohesión obtenida a partir de un tiempo de preparación mayor se demuestra a través de un ensayo sencillo. La Fig. 4.4-1 muestra dos bolas de tierra de 5 cm de diámetro que se dejaron caer desde una altura de 2 m de altura sobre una superficie dura. Ambas se prepararon con la misma consistencia, determinada por el límite plástico. La bola de la izquierda se mezcló durante dos minutos y la de la derecha durante 10 minutos. Una comparación entre ambas demostró que la muestra que se mezclo durante más tiempo presento menor deformación y menor tendencia a la fisuración.

4.4.3 Incremento del contenido de arcilla

Para mezclas de tierra muy pobres (con bajo contenido de arcilla) se emplea un sencillo método para aumentar su cohesividad añadiendo suelo con un alto contenido de arcilla o arcilla pura. Esto es lo más fácil si se dispone de arcilla en polvo que se puede añadir a la mezcla húmeda. Se debe tomar en cuenta que así como la montmorillonita posee una alta cohesividad, a su vez posee también una alta capacidad de expansión y retracción. Es generalmente más sencillo obtener polvo de arcilla de la industria cerámica o de suelos extremadamente arcillosos utilizados

por las ladrilleras. Terrones de barro ricos en arcilla deben sumergirse en agua para formar una lechada, posteriormente se mezcla con el barro en una mezcladora (ver capítulo 3).

4.4.4 Aditivos

La cohesividad de barros pobres puede incrementarse con suero, cuajada descremada (Quark en alemán), queso fresco, orina, estiércol, aceite de linaza doblemente cocido o cola de cal y caseina. Los resultados deben ensayarse en cada caso antes de usar los aditivos en elementos de construcción. Algunos datos compilados por el FEB se pueden ver en la Fig. 4.1-1.

4.5 Incremento de la resistencia a compresión

4.5.1 Generalidades

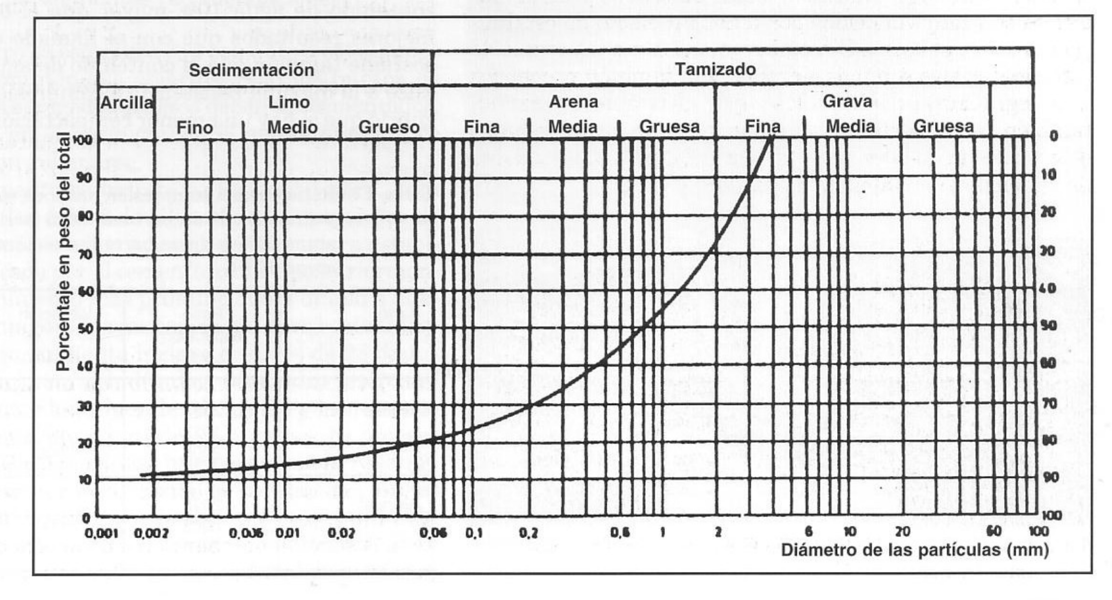
El barro a ser utilizado como material de construcción debe poseer normalmente una resistencia a compresión de 20 a 50 kg/cm² (2 a 5 N/mm². La resistencia a compresión permisible para muros de acuerdo a la norma Alemana DIN 18954 es de 3 a 5 kg/cm². En la practica es poco común que se requiera una resistencia a compresión superior, que sería necesaria solamente en algunos elementos muy expuestos a cargas extremas y ello ocurre solamente en estructuras con muchos pisos. En el caso de los componentes de tierra, la resistencia de las esquinas a los impactos es muy importante y en ocasiones necesita incrementarse. Esta rigidez depende tanto de la resistencia a compresión como de la flexión. Es muy importante durante la construcción cuando los bloques de tierra o adobes se transportan o se apilan.

La resistencia a compresión del barro depende principalmente de su distribución granulométrica, del contenido de agua, de la compactación dinámica o estática, así como del tipo de arcilla. Si las partículas de arena y grava están bien distribuidas, como para obtener el menor volumen de compactación, y si los limos y las arcillas están constituidos de tal manera que todos los espacios intergranulares de la arena y de la grava estén rellenos con ellos. Entonces se alcanza la máxima densidad y con ello mayor resistencia a la compresión.

4.5.2 Preparación

La resistencia a compresión de una mezcla depende del tipo y de la duración del mezclado así como de la proporción de agua que se utiliza, aspecto no muy conocido y poco investigado. En el Instituto de Tecnología de la Construcción de la Universidad Técnica de Zurich, Suiza y en el FEB se comprobó que un barro ligeramente húmedo y compactado en una prensa de bloques de suelo usualmente posee una resistencia a compresión menor que el mismo barro con suficiente agua, mezclado a mano y finalmente solamente arrojado dentro del molde (al igual que cuando se hacen adobes).

En un experimento realizado en el FEB los adobes hechos a mano tenían como promedio una resistencia a compresión mayor a 19% que si fueran producidos en prensas de bloques de suelo que generan una presión de 20 kg/cm² sobre el material. La creencia de muchos investigadores y profesionales que la compresión en prensas de bloques de suelo conduce al incremento de la resistencia a compresión es solo cierta en algunos casos. El "secreto" del barro está en la estructura laminar de sus minerales de arcilla y en su atracción eléctrica interna la misma que se activa a través del agua y del movimiento solamente. Esto significa que al amasar el barro en estado plástico los minerales de arcilla están en condiciones de unirse mejor, en un patrón más denso, alcanzando así una mayor cohesión y al secar una mayor resistencia a compresión. Se hicieron muestras cilíndricas de 76 mm de diámetro y 100 mm de altura y se ensayaron utilizando el equipo que se muestra

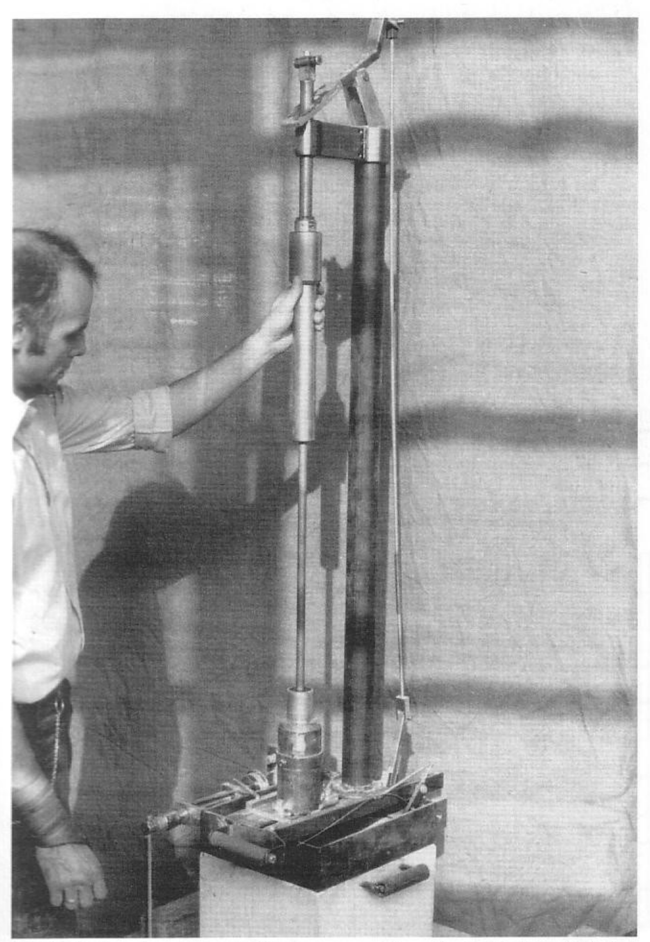


4.5-1
Parábola modificada de Fuller
(Boemans, 1989)

en la Fig. 4.5-1 desarrollado en el FEB para ensayar muestras de una misma densidad. Las muestras se compactan posteriormente con 10 golpes de un peso de 4,5 kg que cae sobre ellas, desde una altura de 0,45 m.
El volumen de la muestra de tierra recientemente excavada es así compactada a un 30% a 40 %.
El mismo suelo limoso se mezcló con agua en una mezcladora mecánica durante 2 minutos y 15 minutos respectivamente y en este estado pastoso se colocó posteriormente en un molde cilíndrico del mismo tamaño. Después de secar la muestra no compactada tiene una resistencia a la compresión de 28% y 38% respectivamente, más alta que aquellas que fueron compactadas. Este ensayo muestra que la preparación puede ser más importante para la resistencia que la compactación. Pero se debe tomar en cuenta que la muestra mencionada anteriormente era limosa y que con barros con alto contenido de arcilla o arena la diferencia no es tan notable.

4.5.3 Compactación

Compactar el barro con fuerza estática para incrementar su resistencia a compresión es por lo general menos afectivo que batir o compactar la mezcla durante el vibrado (aplicando fuerzas dinámicas). Cuando un objeto pesado cae sobre el barro, ocasiona ondas que provocan vibraciones en sus partículas. Esto a su vez, crea movimientos que permiten a las partículas entrar en un patrón más denso. Asimismo, si hay suficiente agua, los minerales de arcilla tienen la capacidad de formar una estructura interlaminar paralela, que es más ordenada y que conduce a una mayor cohesión y resistencia a compresión.
La Tabla 4.1 muestra la efectividad comparativa de la compactación dinámica en relación a la estática, basada en varios ensayos realizados en el FEB. En ella se puede observar que la resistencia a compresión de un barro arenoso bajo una presión constante aplicada por 10 segundos, vibrando a 3000 ciclos por minuto incrementa en un 14%.
Para cada técnica de preparación existe un contenido de agua óptimo que solo puede ser determinado mediante ensayos. De acuerdo a la Norma Alemana DIN 18127 el contenido óptimo de agua es el contenido de agua con el cual la máxima densidad en seco es alcanzada. La compactación se debe hacer con un martillo Proctor. Con el objetivo de obtener el contenido óptimo de agua, muestras con diferentes contenidos de agua se compactan de esta manera y se determina su densidad. El contenido de agua que ofrezca la mayor densidad se llama el contenido óptimo de agua. La curva que se obtiene uniendo esos puntos se denomina Curva Proctor (Fig. 4.5-2).
Sin embargo, en la construcción con tierra, la máxima densidad o compactación y por lo tanto el llamado contenido óptimo de agua no conducen necesariamente a la máxima resistencia a compresión y este no es un parámetro decisivo. Por el contrario, la trabajabilidad y la cohesión son los parámetros decisivos y por ello se recomienda que el barro no se emplee con un contenido de agua óptimo como en la DIN 18127 sino con un contenido de agua algo mayor que el óptimo obtenido.
De hecho, este llamado contenido óptimo de agua debe ser tomado en la practica como el contenido mínimo de agua. Con bloques de tierra compactados, se observo que con un contenido de agua 10% mayor que el óptimo se obtiene mejores resultados que con el llamado óptimo. Boemans sostiene también que el contenido de agua óptimo no conduce a la máxima resistencia a compresión. Asimismo descubrió que si hay una menor compactación y un mayor con-



4.5-2 Equipo de compactación para muestras de suelo desarrollado en el FEB, Kassel

Tabla 4.1 Resistencia a compresión luego de compactación estática y dinámica de un barro arenoso (arcilla 15%, limo 29%, arena 56%) y de un barro limoso (arcilla 12%, limo 74%, arena 14%)

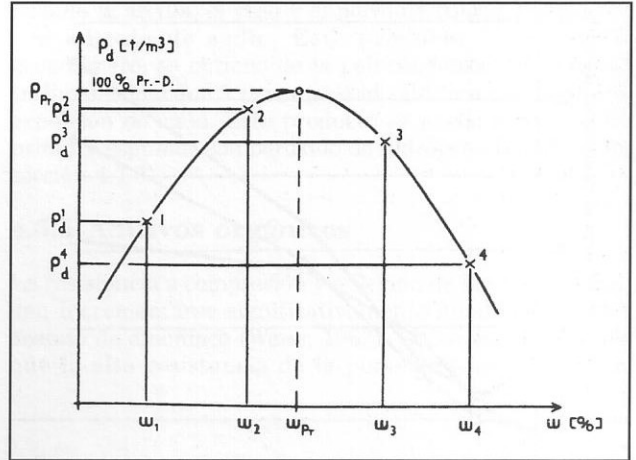
Barro	Peso específico (kg/m²)	Vibración (l/min)	Fuerza de compresión (N/mm²)
Limoso	2003	0	3,77
	1977	1500	4,11
	2005	3000	4,17
Arenoso	2023	0	2,63
	2009	1500	2,91
	2024	3000	3,00

tenido de agua se puede alcanzar la misma resistencia a compresión utilizando mayor compactación y menor contenido de agua (Boemans 1989, p.60 en adelante). En el Laboratorio Géomatériaux, Ecole Nationales des Travaux Publics de l' etat, Vaulx en Velin Cedex (ENTPE), Francia, se encontró que el tipo de los minerales de arcilla también produce un efecto sobre la resistencia a compresión luego de la compactación. Se encontró, por ejemplo, que incrementando la presión estática de 2 a 8 MPa para producir bloques empleando una prensa, la resistencia a compresión incrementa en un 50% con caolinita y aproximadamente en 100% con montmorillonita (Oliver, Mesbah, 1985)

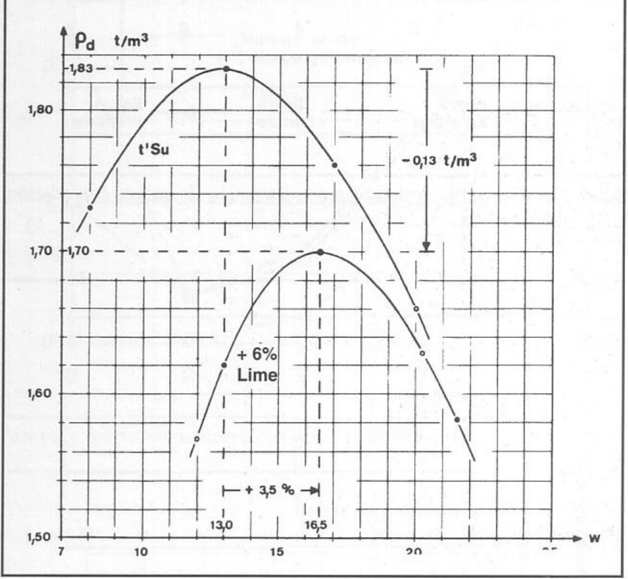
4.5.4 Aditivos minerales

Un barro arcilloso pobre puede alcanzar una resistencia a compresión alta con adición de arcilla montmorillonita. En el FEB se hicieron ensayos con arena enriquecida con 17% en peso de caolinita y bentonita respectivamente. (la bentonita tiene aproximadamente 70% de montmorillonita). Con caolinita la resistencia a compresión alcanzada fue de 5 kg/cm², mientras que con bentonita fue de 12 kg/cm2. La adición de cal y cemento usualmente utilizada para incrementar la resistencia del barro a las inclemencias del tiempo incrementa generalmente también la resistencia a compresión. Sin embargo, esta puede también decrecer con esos aditivos especialmente cuando su cantidad es menor al 5%. Esto se debe a que la cal y el cemento interfieren con la cohesión de los minerales de arcilla. Mientras mayor sea el contenido de arcilla mayor debe ser la cantidad de cal o cemento a adicionar.
Ensayos mostraron que generalmente la cal da un mejor efecto de estabilización con barros ricos en arcilla mientras que el cemento da mejores resultados con barros pobres. Además el cemento es más efectivo con caolinita y la cal con montmorillonita. En la practica se recomienda siempre hacer los ensayos pertinentes. Al efectuarlos se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. Cuando el barro se estabiliza con cemento o cal algunos poros deben mantenerse abiertos. Solo los puntos de contacto de los agregados gruesos deben ser cementados, pero no como en el hormigón en el que la mayoría de los poros deben rellenarse.
2. Cuando el cemento se hidrata se forma cal libre. Esta reacciona con los ácidos de silicato de los minerales de arcilla de tal manera que además de la primera estabilización provocada por el cemento, ocurre posteriormente un endurecimiento más pronunciado. Por ello a diferencia del hormigón, la resistencia del barro estabilizado con cemento, aumenta incluso después de 28 días.
3. Cuando se adiciona cal hidráulica ocurre un intercambio de iones entre los minerales de arcilla y los iones de calcio adicionados que dura de 4 a 8 horas. El proceso de endurecimiento adicional provocado por la reacción de la cal hidratada con el dióxido de carbono del aire es muy lento. Aún después de muchos meses se puede observar un pequeño incremento de la resistencia. Para este proceso de curado una cierta cantidad de humedad es esencial por eso los elementos de tierra deben ser protegidos del asoleamiento directo y el viento.
4. Cuando se adiciona cal, el contenido óptimo de agua incrementa, mientras que la densidad en este estado disminuye, a diferencia de cuando no se adiciona cal. (Fig. 4.5-3).

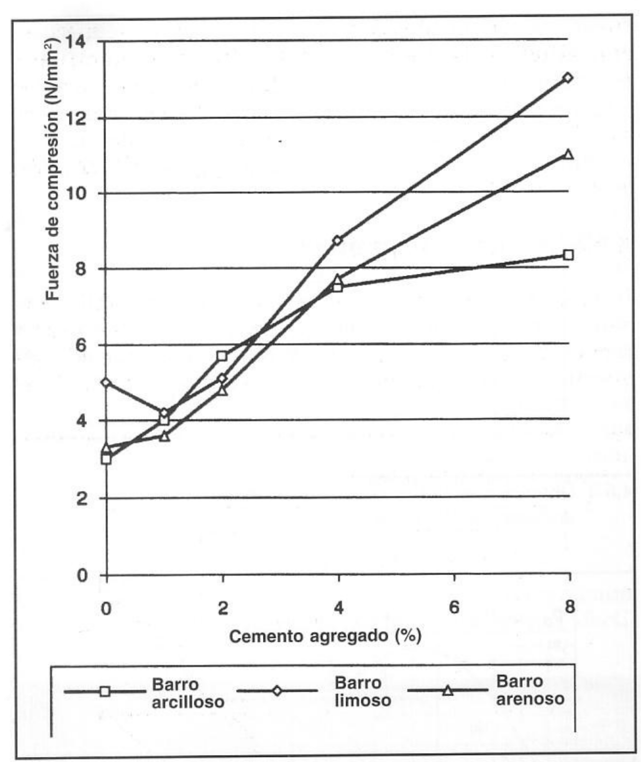


4.5-3 Obtención de la Curva Proctor mediante un método de multipuntos (Voth, 1978)

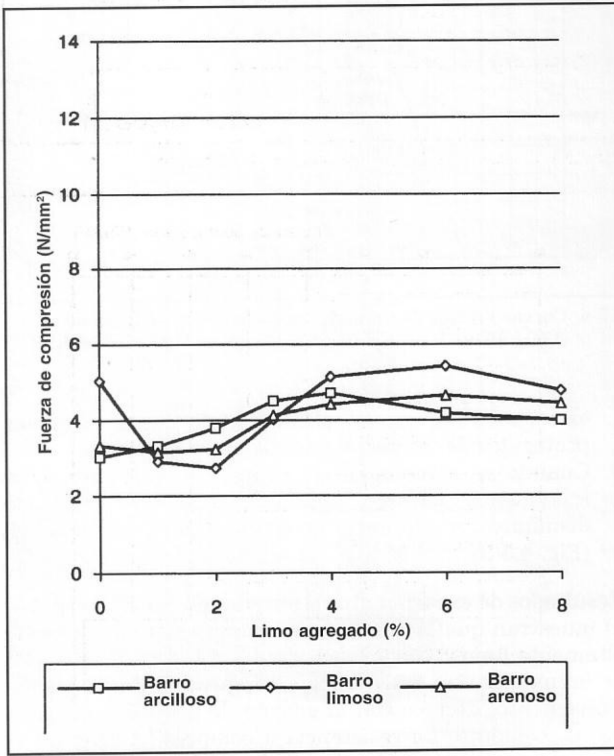


4.5-4 Curvas Proctor de un barro limoso con y sin adición de cal (Voth, 1978)

Resultados de experimentos realizados en el FEB (Fig. 4.5-4) muestran que la resistencia a compresión de un barro altamente limoso con 12% de arcilla, 74 % de limo y 14% de arena con una resistencia a compresión de 50 kg/cm² sin cemento, decrece con la adición de pequeñas cantidades de cemento. La resistencia a compresión original se alcanza nuevamente con la adición del 2% de cemento. Como se puede ver la Fig. 4.5-5 esa resistencia original se



4.5-5 Cambios en la resistencia a compresión de barros con adición de cemento



4.5-6 Cambios en la resistencia a compresión de barros con adición de cal

alcanza adicionando 4% de cal. En este caso está disminuye nuevamente luego de una estabilización con cal de 6%. Aún más significativa es la reducción de la resistencia a compresión cuando se estabilizan morteros de barro pobres como se muestra en la Fig. 4.5-6 a la derecha. A la izquierda de la misma figura se pueden ver los cambios correspondientes a la tracción en flexión. Los valores de las resistencias a compresión en seco y húmedo de adobes hechos a mano con porcentajes variables de contenidos de cemento se muestran en la Fig. 4.5-7. Investigaciones hechas en la ENTPE muestran que caolinita pura con 4% de cemento incrementa la resistencia a compresión, pero que con montmorillonita la misma cantidad de cemento muestra una disminución en la resistencia.

La resistencia a compresión de ambos tipos de arcilla es incrementada aproximadamente en un 100% con la adición de 4% de cal y 2% de cemento (Oliver, Mesbah, 1985). Se debe tomar en cuenta que esos ensayos se hicieron con un contenido óptimo de agua y con arcilla pura. Sin embargo, en la practica común este incremento no es tan alto, ya que el barro utilizado en la construcción usualmente contiene 5 a 15% de arcilla y no debe utilizarse con un contenido óptimo de agua.

Resultados de ensayos efectuados por el FEB con adobes hechos a mano se muestran en la Fig. 4.5-8 y 4.5-9.

En ellos, se ensayaron cuatro diferentes mezclas de arena y arcilla con adición de 6% de cemento y cal respectivamente. Es interesante señalar que los resultados fueron aproximadamente los mismos en el caso de la arena para revoques y la arena con bentonita.

Cuando se adiciona cal a estas mezclas las resistencias a compresión de un barro caolinitico son todavía menores que con arena (Fig.4.5-9). De estas investigaciones surgen las siguientes recomendaciones:

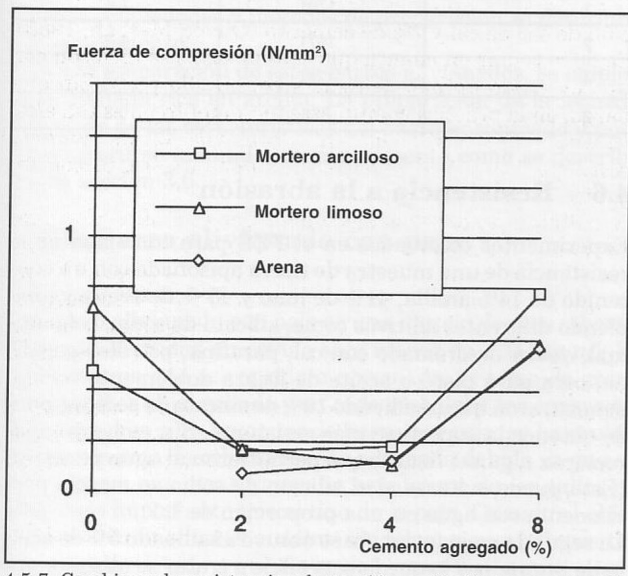
1. Un barro con alto contenido de caolinita se debe estabilizar con cemento (y no con cal)
2. Un barro con alto contenido de montmorillonita se debe estabilizar con cal o con una mezcla de cal y cemento en una proporción de 2:1.
3. Una fuerte compactación incrementa significativamente la resistencia a compresión de la montmorillonita. Este efecto es pequeño con la caolinita. CRATerre sugiere estabilizantes apropiados sobre la base del limite líquido, limite plástico e índice de plasticidad (Fig. 4.5-10) sin tomar en cuenta el tipo de los minerales de arcilla (CRATerre, 1979).

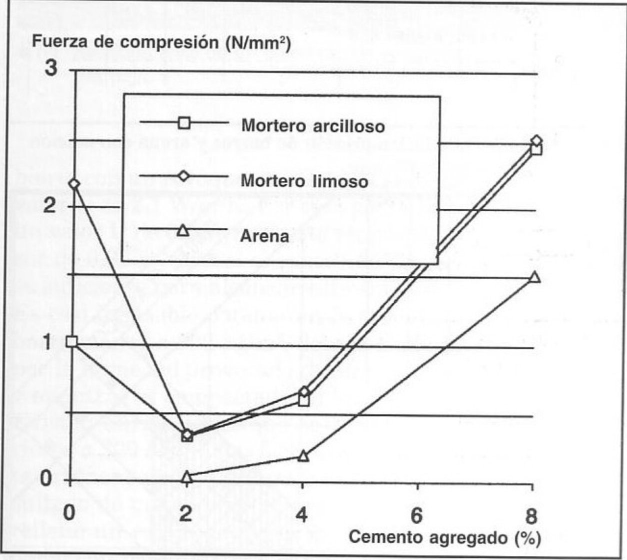
Cuando se añade cemento al barro, la mezcla debe utilizarse inmediatamente debido a que el fraguado del cemento comienza enseguida. Si se deja reposar la mezcla por varias horas antes de compactarse en bloques de suelo, la resistencia a compresión de estos bloques puede reducir más de 50%. En cambio, si se añade cal este lapso de tiempo no tiene una influencia negativa en la resistencia final. Si se añade menos de 5% de cemento, el proceso de secado afecta a la resistencia a compresión. Si los bloques permanecen expuestos al viento y al sol directo, lo que significa que secan rápidamente, su resistencia final puede reducirse en un 20% en comparación con bloques que se mantuvieron protegidos con recubrimientos húmedos. Si el recu-

brimiento húmedo no es posible por lo menos deben estar protegidos del sol directo y rociados con agua varias veces al día.
Cuando se añade 10% de cemento, esta protección es menos relevante para la resistencia final de los bloques (Houben, Guillaud 1983). Si se añade puzolana con cal se obtiene un efecto adicional de estabilización y la cantidad de cal puede reducirse. Algunas cenizas volcánicas muestran propiedades puzolánicas como las cenizas volantes y la ceniza de cáscara de arroz. El polvo de ladrillos cocidos a baja temperatura posee también bajas propiedades puzolánicas. En cambio, el polvo de ladrillos cocidos a altas temperaturas en ladrilleras industriales no posee ninguna. Un efecto interesante de estabilización se observa cuando la arcilla, el yeso y el polvo de cuarzo se mezclan con silicato de sodio. Este producto, denominado geopolímero, se obtiene de la poli-condensación: una red tridimensional que ocurre en estado alcalino mediante una expulsión de agua. Este producto se puede extruir, comprimir o espumar con peróxido de hidrógeno (H2O2). (Ver sección 4.7.6)

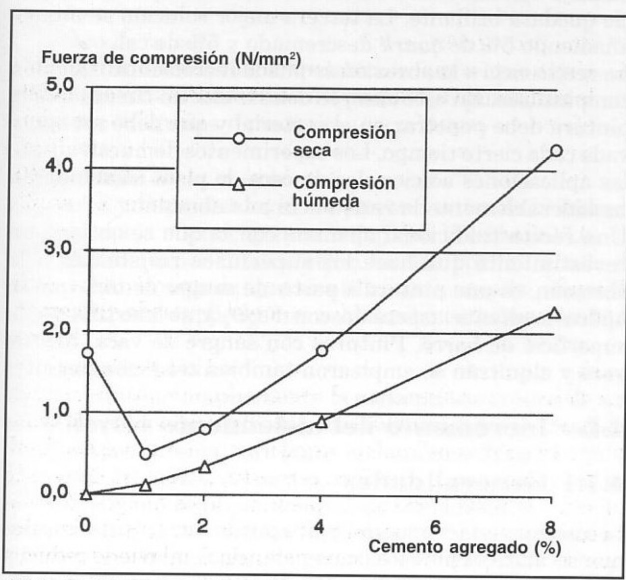
4.5.5 Aditivos orgánicos

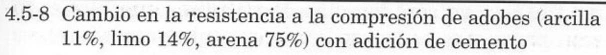
La resistencia a compresión y a flexión de la caolinita pueden incrementarse significativamente añadiendo urea y acetato de amoníaco (Weiss, 1963). Weiss sugiere además que la alta resistencia de la porcelana proviene de la

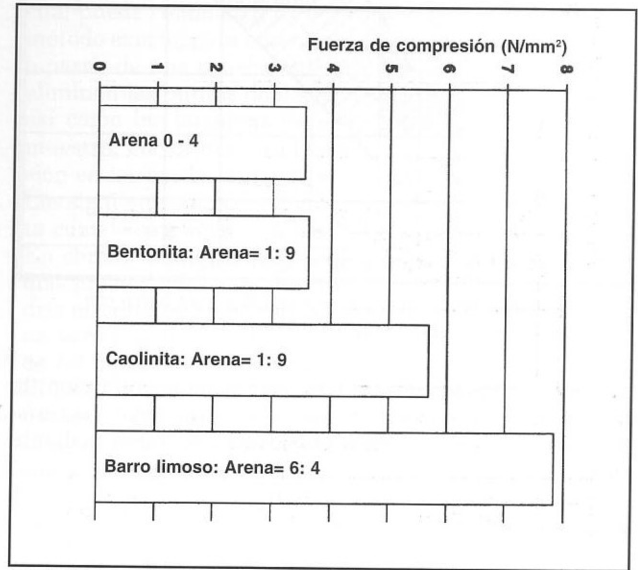




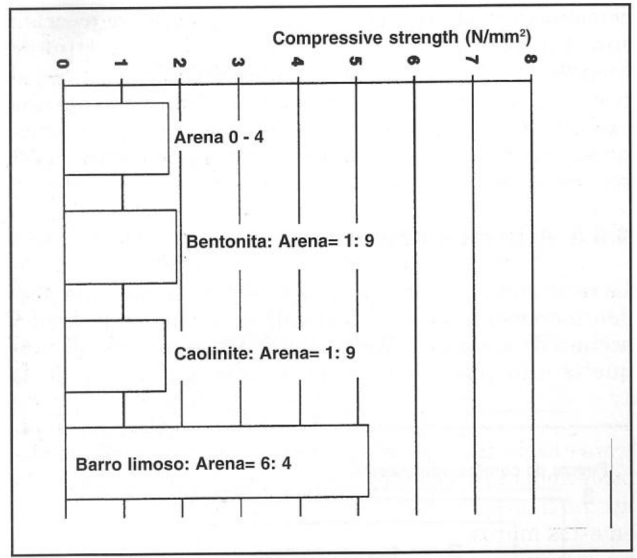
4.5-7 Cambio en la resistencia a la tensión en flexión y a compresión de arena y morteros de barro con adición de cemento



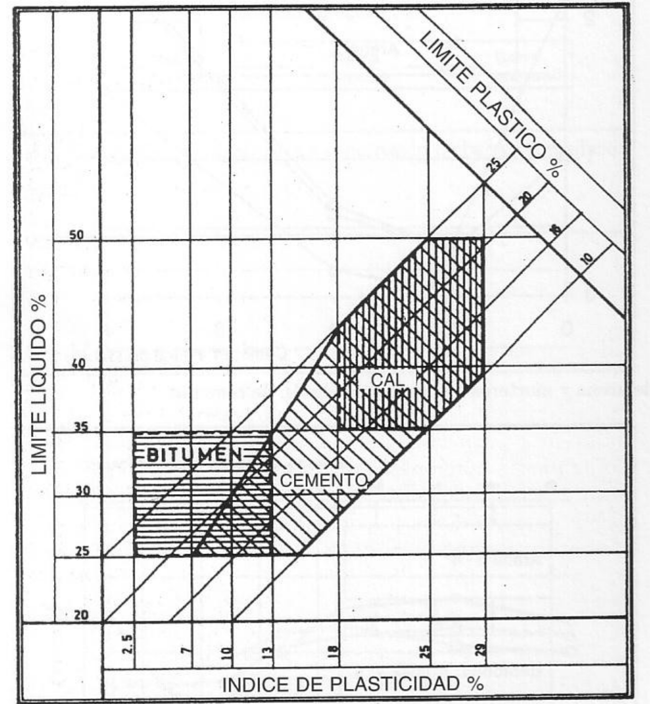

4.5-8 Cambio en la resistencia a la compresión de adobes (arcilla 11%, limo 14%, arena 75%) con adición de cemento



4.5-9 Resistencia a la compresión de barros y arena con adición de 6% de cemento



4.5-10 Resistencia a la compresión de barros y arena con adición de 6% de cal of 6% limo



4.5-11 Estabilizadores apropiados sugeridos para barro con relación a su plasticidad (CRATerre, 1979)

caolinita embebida en orina en estado de putrefacción (la misma que contiene urea y acetato de amoníaco). La resistencia a la tensión en flexión puede incrementarse mediante este método aproximadamente de 10 a 20 veces.

4.5.6 Adición de fibras

Las fibras se añaden generalmente con el objetivo de reducir las fisuras de retracción. Se menciona a menudo que las fibras incrementan siempre la resistencia a compresión, pero esta opinión usualmente no es correcta. Cuando se añaden fibras finas o pelos en pequeñas cantidades la resistencia en tensión y por consiguiente la resistencia a compresión incrementan levemente. Sin embargo, cuando se añade paja, el efecto opuesto ocurre, como se ha demostrado mediante investigaciones realizadas en el FEB (ver tabla 4.2)

Tabla 4.2 Reducción de la resistencia a compresión del barro con adición de paja cortada (5 cm)

Paja (%/masa)	Peso (kg/m³)	Fuerza de Compresión (N/mm²)
0	1882	2.2
1	1701	1.4
2	1571	1.3
4	1247	1.1
8	872	0.3

4.6 Resistencia a la abrasión

Experimentos efectuados en el FEB para incrementar la resistencia de una muestra de tierra apisonada con un contenido de 14% arcilla, 41% de limo y 45 % de arena y añadiendo diferentes aditivos como, silicato de sodio, cola animal, *quark* descremado con cal, parafina, petróleo-parafina, cera para pisos o aceite de linaza doblemente cocido, demostraron que añadiendo 10% de silicato de sodio se puede obtener la superficie más resistente. Sin embargo aparecieron algunas fisuras que permitieron al agua penetrar. (Esto puede evitarse si el silicato de sodio se mezcla previamente con agua en una proporción de 1:1).
La segunda mejor solución se obtuvo añadiendo 5% de aceite de linaza, por lo que la superficie a tratar se aliso con un badilejo cerrando las fisuras de tal manera que la superficie quedara brillante. La tercera mejor solución se obtuvo añadiendo 5% de *quark* descremado y 5% de cal.
La resistencia a la abrasión se puede incrementar también con pinturas. En este caso, se debe tomar en cuenta que la pintura debe penetrar en el material y que debe ser renovada cada cierto tiempo. Los experimentos demuestran que las aplicaciones adicionales de cera de pisos incrementan considerablemente la resistencia a la abrasión.
Una receta tradicional alemana con la que se obtiene un revestimiento que hace las superficies resistentes a la abrasión, es una pintura a partir de sangre de toro que se aplica mediante aspersión con Fe_3O_4 y se martilla en la superficie de barro. Pinturas con sangre de vaca, hiel de vaca y alquitrán se emplearon también tradicionalmente.

4.7 Incremento del aislamiento térmico

4.7.1 Generalidades

El aislamiento térmico del barro puede incrementarse añadiendo aditivos porosos como paja, algas marinas, corcho y otras fibras vegetales livianas. Partículas minerales porosas de origen natural o artificial como piedra pómez, lava,

arcilla expandida, vidrio expandido, perlita expandida o partículas vegetales porosas como el corcho expandido pueden ser añadidos. Desechos como aserrín, virutas de madera, cáscara de granos pueden también ser utilizados pero debido a su alta densidad y su baja porosidad dan un efecto de aislamiento menor. Mientras más porosa la mezcla más ligera es y mayor su aislamiento térmico.
De acuerdo a la Norma Alemana DIN 18951, el barro con agregados livianos se denomina barro alivianado si su densidad es menor 1200 kg/m^3. Si se emplea paja como agregado este se denomina barro alivianado con paja, mientras que si se emplea aserrín o virutas de madera se trata de un barro alivianado con madera. Si se emplean agregados minerales porosos se denomina barro alivianado con mineral. Ya que estos tres tipos de barros alivianados difieren en sus propiedades y métodos de preparación se describen separadamente.
Para la preparación de estos barros alivianados, se emplea una lechada rica en arcilla. La preparación de la lechada depende de las características del barro encontrado y puede elaborarse manual o mecánicamente como se describe en la sección 3.6.

4.7.2 Barro alivianado con paja

Generalidades
El barro alivianado con paja es una mezcla de paja y barro con una densidad en estado seco menor de 1200 kg/m^3. El tipo de paja que se considera apropiada, es tema de grandes debates en el mundo y en cada caso debe ser ensayada. Sin embargo para revoques de barro con paja, se ha probado que la paja de cebada es más adecuada debido ya que es más suave que otras pajas. La estructura de los tallos es aún más importante que el tipo de la paja. Cuando el objetivo es incrementar el aislamiento térmico se prefieren tallos rígidos debido a que no se deforman fácilmente, manteniendo el aire encapsulado.

Cortado de la paja
La longitud de los tallos no debe ser mayor que el espesor del elemento constructivo. El cortado se puede hacer con métodos manuales o mecánicos.

Preparación de la mezcla
El barro y la paja se mezclan ya sea vertiendo la lechada sobre la paja o sumergiendo la paja en la lechada. Los tallos deben quedar totalmente cubiertos por la lechada de barro. La manera en que se utiliza esta mezcla para diferentes tipos de aplicaciones se describe en la sección 10.3.

Aislamiento térmico
Se ha expuesto ampliamente la concepción errónea de que el barro con paja empleado como relleno en los entramados medievales ofrecía suficiente aislamiento térmico. Si se mezclan 10 partes de paja picada con una lechada espesa de barro compuesta por 2 partes de tierra arcillosa seca y 1 parte de agua, se obtiene una mezcla con una densidad seca de aproximadamente 1300 kg/m^3 y un valor lambda de aproximadamente 0,53 W/mK. De este modo, un elemento típico de ese material con un espesor de 14 cm cubierto con un revoque de cal de 2 cm en ambas caras da un valor U de 2.1 W/m^{2}K. Por otra parte, si se quiere alcanzar un valor U de 0.5 W/m^{2}K este muro debería tener un espesor de 0.95 m. Aún si el contenido de paja se triplicara no es suficiente para alcanzar este valor de U.


4.7-1 Asentamiento de un elemento de ensayo de barro alivianado con paja.

Es casi imposible obtener en la practica una densidad del barro menor a 500 kg/m^3, debido a que la paja se ablanda por la humedad provocada durante el proceso de mezclado y mientras es compactado en los moldes.
Existen afirmaciones que sostienen que densidades inferiores a 300 kg/m^3 son factibles, pero estas son usualmente erróneas ya que generalmente están basadas o son resultado de métodos de ensayo inexactos. Es típico, que se rellene un molde pequeño de ladrillo con una mezcla de barro con paja sin compactar. Esta muestra se pesa luego de secar y se divide el peso por el volumen del molde lo cual puede conducir a errores de hasta un 40%. El único método exacto, para obtener la densidad, es cortar un cubo a partir de una prueba más grande, de tal manera que se eliminen las puntas dobladas de las pajas en las esquinas, así como las burbujas de aire. Mientras más grande la muestra, mayor exactitud debido a que siempre existe erosión en los bordes durante el cortado y la manipulación.
Los siguientes consideraciones deben ser tomadas en cuenta cuando se trabaja con barro alivianado con paja:
En climas templados o húmedos, se forma luego de pocos días moho y emite un olor intenso característico. Esto podría en casos extremos provocar alergias. Por ello, una buena ventilación durante la construcción debe garantizarse de tal manera que los componentes sequen rápidamente. El moho no crea más esporas cuando los muros secan totalmente, proceso que podría tomar varios meses e incluso más de un año dependiendo del espesor del muro y del clima. Sin embargo, la formación de esporas se reactiva si el agua penetra al muro, ya sea desde afuera por escurrimiento o desde adentro por condensación. El crecimiento de moho se puede inhibir añadiendo cal o bórax. Pero en este caso la cohesión y la resistencia a compresión disminuyen significativamente. Así como, los muros de espesor

mayor a 25 cm pueden parecer secos en la superficie mientras que en el interior estén podridos. (ver sección 10.3)

Consideraciones en relación al barro alivianado con paja

1. La resistencia de la superficie de la mezcla para un muro con una densidad menor a 700 kg/m³ es por lo general muy baja para poder fijar clavos o tarugos que muchas veces se requieren en una edificación. El revoque es más laborioso debido a que se requieren dos capas y a veces algún reforzamiento intermedio.
2. Al secar, se originan asentamientos verticales que provocan la aparición de aberturas en la parte superior del elemento (Fig. 4.7-1). Estas deben ser cuidadosamente rellenados de tal manera que se eviten puentes de calor y sonido así como infiltración de aire.
3. El trabajo con este material es muy laborioso. Sin equipos especiales para mezclar y transportar, el rendimiento de construcción para un muro de 30 cm de espesor es de aproximadamente 6h/m² (20h/m³). En relación a la mampostería usual de ladrillo, esta vez cuatro veces mayor.

Las desventajas mencionadas pueden evitarse si se emplean agregados minerales porosos en vez de paja, este punto se trata en la próxima sección. La ventaja del barro alivianado con paja, puede ser el bajo costo de los materiales y la posibilidad de utilizarlo sin necesidad de herramientas y maquinaria especializadas. Por eso es especialmente apropiado para la autoconstrucción.

4.7.3 Barro alivianado con agregados minerales

Generalidades

Con el objetivo de incrementar el aislamiento térmico se pueden añadir al barro agregados minerales porosos como por ejemplo, arcilla expandida, vidrio expandido, lava expandida, perlita expandida o piedra pómez. Usualmente al utilizar barro alivianado hay una retracción desventajosa, pero es posible obtener una retracción de cero, eligiendo las correctas proporciones de los agregados minerales.

En comparación con el barro con paja, la resistencia a la difusión de vapor es dos a tres veces mayor y por eso la probabilidad de condensación del agua, dentro del muro es menor (ver sección 2.4.2).

Otra ventaja de estas mezclas es que pueden ser bombeadas directamente en el molde, reduciendo así la mano de obra considerablemente. Las densidades que se alcanzan varían entre 500 kg/m³ a 1200 kg/m³.

Aditivos

En algunos países industrializados, la arcilla expandida es un material de bajo costo. Tiene una densidad (peso por unidad de volumen) de aproximadamente 300 kg/m³ y se produce quemando barro en hornos rotatorios a 1200°C sin ningún otro aditivo que ocasione la expansión. Esta ocurre debida al súbito calentamiento que originan el agua de cristalización y el agua de los poros al evaporarse (similar a cuando se hacen palomitas de maíz). Los poros de estas bolas de arcilla expandida se cierran y por ello no absorben agua. El equilibrio en el contenido de humedad en volumen es solo de 0.03%.

El vidrio expandido tiene características similares a la arcilla expandida pero tiene una densidad menor. Puede ser producido reciclando vidrio con algunos aditivos adicionales.

La perlita expandida se produce a partir de roca volcánica (que se encuentra en Europa, en la isla Griega de Milos y en Hungría). Esta contiene de 3 a 6% de agua de cristalización y cuando se calienta súbitamente a 1000°C esta se evapora y aumenta el volumen inicial de 15 a 20 veces. La densidad puede ser como mínimo 60 kg/m³ y el valor lambda de 0.045 W/mK. La resistencia a la difusión de vapor es aproximadamente 2.7. El calor específico es de 1000 J/kgK. Con un material de densidad de 90 kg/m³ se alcanza un valor lambda de 0.05 W/mK. La composición química de la perlita expandida es SiO_2 (60 a 75%), Al_2O_3 (12 a 16%), Na_2O (5 a 10%).

La lava expandida es similar a la perlita expandida de origen volcánico, pero su densidad es mayor.

La piedra pómez es una piedra porosa que se expande durante su formación volcánica. Su densidad varia entre 500 a 750 kg/m³.

Mezclado

Mientras que para producir mezclas de barro se requieren mezcladoras de fuerza (ver sección 3.3.) el barro alivianado con minerales puede producirse en una mezcladora de hormigón común. En esta mezcladora, los agregados se pueden colocar previamente y la lechada de barro se vierte encima. La mezcla se prepara en 3 a 5 minutos. La lechada debe tener un alto contenido de arcilla y una alta cohesión. La elaboración de la lechada de barro se describe en la sección 3.6.

Distribución granulométrica

La distribución granulométrica de los agregados minerales afecta a las propiedades del barro alivianado con mineral.

La cantidad de la lechada de barro debe ser determinada de tal manera que los espacios entre las partículas de los agregados no estén completamente rellenos, lo que significa que los agregados solo estén pegados entre si, en los puntos de contacto. Una densidad de 500 kg/m³ se puede alcanzar si se añaden 2.5 partes de barro a 12 partes de arcilla expandida (8 a 16 mm). Sin embargo los bloques elaborados con esa mezcla poseen unas baja rigidez en las esquinas y en la superficie. Una mezcla más resistente se obtiene con 24 partes de arcilla expandida (8 a 16 mm), 5 partes de arcilla expandida (1 a 2 mm) y 5 a 7 partes de barro. La densidad que se alcanza con esta mezcla es de 640 a 700 kg/m³.

Manipulación

El barro alivianado con mineral a diferencia del barro alivianado con paja puede ser vertido e incluso bombeado si posee una consistencia adecuada. Los métodos de preparación y manipulación de esta mezcla se explican en detalle en la sección 10.

Aislamiento térmico

El aislamiento térmico del barro alivianado con mineral depende fundamentalmente de su densidad y es el mismo

que el del barro alivianado con paja cuando su densidad es mayor de 600 kg/m^3. Para mezclas con densidades menores a 600 kg/m^3 el aislamiento térmico de los barros alivianados con mineral es un tanto mejor que el de los barros alivianados con paja, debido a que la paja tiene un equilibrio de contenido de humedad más alto y por consiguiente más humedad, lo que reduce el aislamiento. Por ejemplo el contenido de humedad de equilibrio de la paja de centeno, para una humedad relativa de 50% y una temperatura de 21°C, es de 13% mientras que este contenido de humedad es de 0.1% en el caso de arcilla expandida.

Energía primaria
Muchas veces se argumenta que los agregados minerales artificialmente expandidos como la arcilla expandida requieren una cantidad considerable de energía para su producción. En ese contexto se debe saber que la energía necesaria para la producción de madera o ladrillos utilizados en la construcción es mucho más alta. La energía que precisa la madera de construcción puede ser 6 veces más alta que para la lana mineral y 2 veces más alta que la necesaria para la arcilla expandida para un mismo volumen (Turowski 1977, Weller and Rehberg 1979, Elias 1980, Marmé and Seeberger 1982).

4.7.4 Barro alivianado con corcho

En vez de agregados minerales porosos se puede emplear corcho expandido para alivianar el barro. La ventaja del empleo de corcho expandido es su baja densidad. La desventaja es que este material tiene un costo relativamente elevado, además de su baja resistencia a compresión. Por ello, los bloques elaborados con esta mezcla tienden a resquebrajarse fácilmente en los bordes.

4.7.5 Barro alivianado con madera

Aserrín, virutas y chips de madera pueden ser utilizados como aditivos alivianantes para incrementar el aislamiento térmico del barro. Debido a que la madera tiene una densidad mayor que la paja y el corcho el aislamiento térmico de esta mezcla es obviamente menor. La densidad mínima que se puede alcanzar es aproximadamente de 500 kg/m^3, pero una mezcla seca de esta densidad no posee ya una rigidez suficiente. El riesgo de la aparición de moho y la putrefacción es menor que con la paja pero es aún latente.
Es ecológicamente deseable utilizar los chips elaborados a partir de ramas y partes de arboles que no pueden ser utilizados como elementos estructurales. Sin embargo estos contienen grandes cantidades de corteza y son por ello susceptibles a desarrollar moho y a la putrefacción.

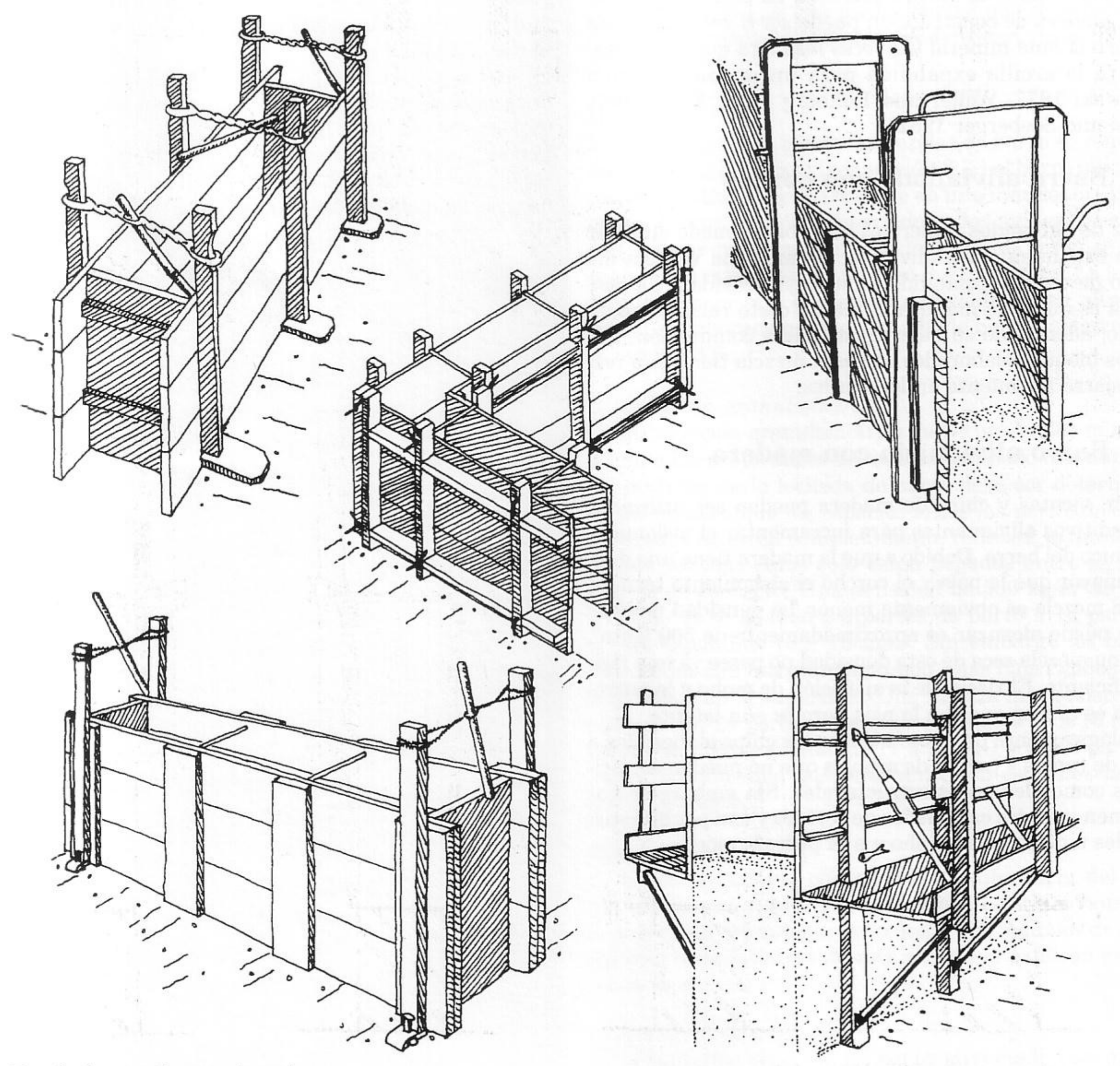
4.7.6 Barro espumoso

Para espumar el barro, este debe estar libre de arena y grava y en estado plástico. Ya que el barro en esta consistencia necesita un período largo para el secado, es poco probable que pueda espumarse empleando los aditivos comunes como los que se utilizan para espumar hormigón. Por ello, el barro requiere de aditivos que aceleren el proceso de secado, como los geopolímeros descritos en la sección 4.5.5, donde la arcilla, el cuarzo y el polvo de yeso se mezclan con silicato de sodio, y se espuman con peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Con este proceso puede elaborarse, un barro espumoso con una densidad de 90 kg/m^3. Este material endurece a una temperatura de 20°C en dos horas y a 50°C en una hora.
Este producto manufacturado por la empresa Alemana Hüls AG, posee una resistencia a compresión de 10 a 20 kg/cm^2, un calor específico de 0.2 kJ/kgK, una conductividad térmica de 0.10 a 0.12 W/mK, un pH de entre 9 y 10. Es un material ideal para elaborar elementos prefabricados de barro de grande escala.
La empresa alemana Lorowerk, Bad Ganders-heim, produce grandes elementos de aislamiento térmico con una técnica similar.
Productos con una densidad de 300 kg/m^3 alcanzan una conductividad térmica de 0.08 W/mK. La energía requerida para su elaboración es de solo 5 KWh/m^3.

5. Tierra apisonada (Tapial)

5.1 Generalidades

La tierra apisonada fue bien conocida por siglos en todos los continentes del mundo como técnica tradicional de construcción de muros. De hecho, en Asiria se encontraron cimientos de tierra apisonada que datan del año 5000 a.C.
La técnica consiste en rellenar un encofrado con capas de tierra de 10 a 15 cm compactando cada una de ellas con un pisón.
El encofrado está compuesto por dos tablones paralelos separados, unidos por un travesaño (Fig. 5.2-1). En francés esta técnica se denomina pisé de *terre* o *terre pisé*, en inglés *rammed earth*, en alemán *Stampflehmbau*.
La técnica tradicional de la tierra apisonada se utiliza hoy todavía en países en vías de desarrollo. Sistemas de encofrado más sofisticados y una compactación mediante la utilización de pisones eléctricos o neumáticos reducen los costos de mano de obra significativamente y hacen de esta técnica una opción relevante en países industrializados. Esta tecnología mecanizada para ejecutar muros de barro apisonado en relación a la construcción convencional con ladrillos no es solo una alternativa viable desde el punto de vista ecológico sino económico, especialmente en aquellos países desarrollados donde por razones climáticas no hay grandes requerimientos de aislamiento térmico. En el sudoeste de los Estados Unidos y Australia existen varias empresas que ejecutan hace varios años esta técnica de construcción.

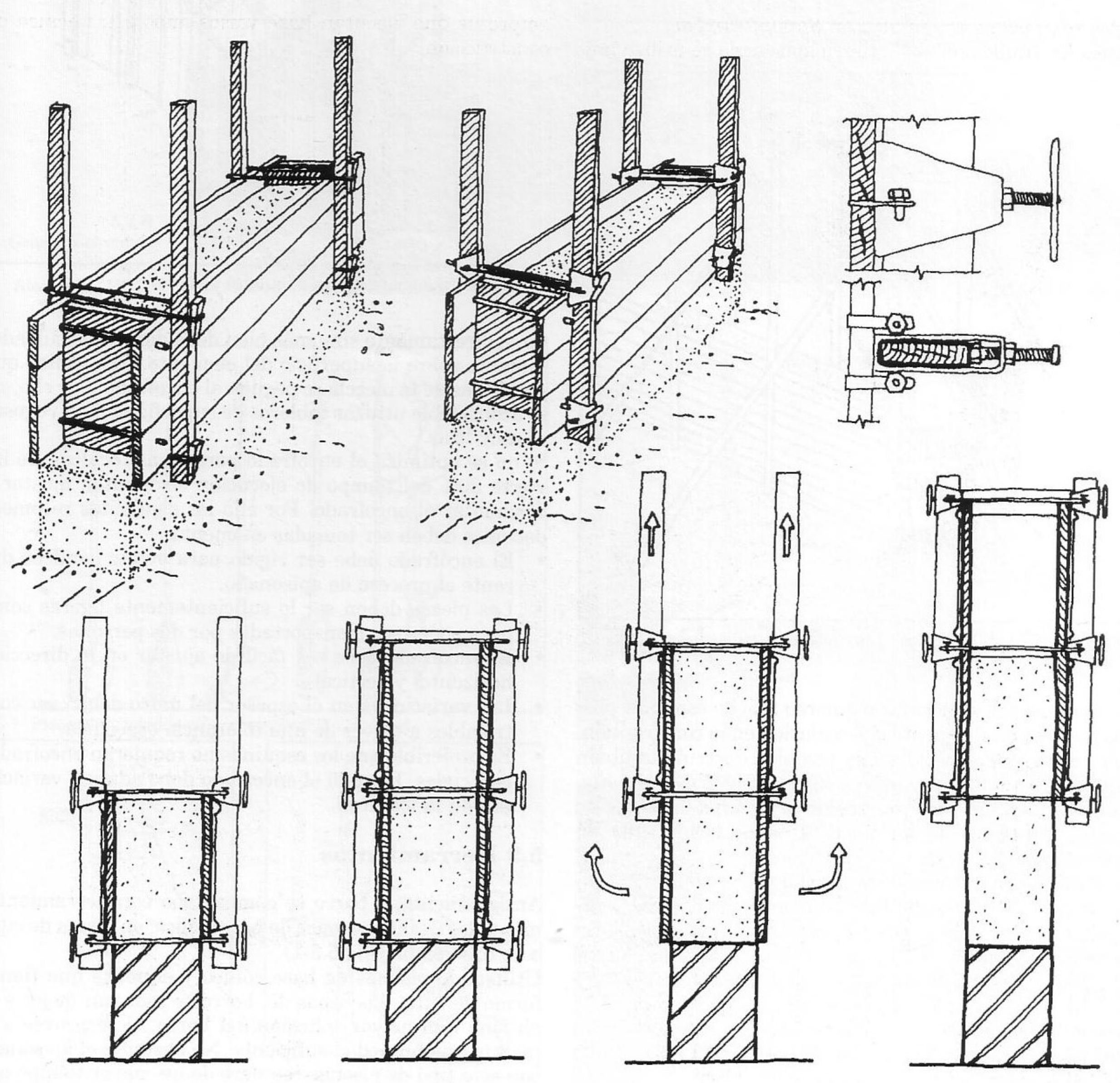


5.2-1 Encofrados para barro apisonado

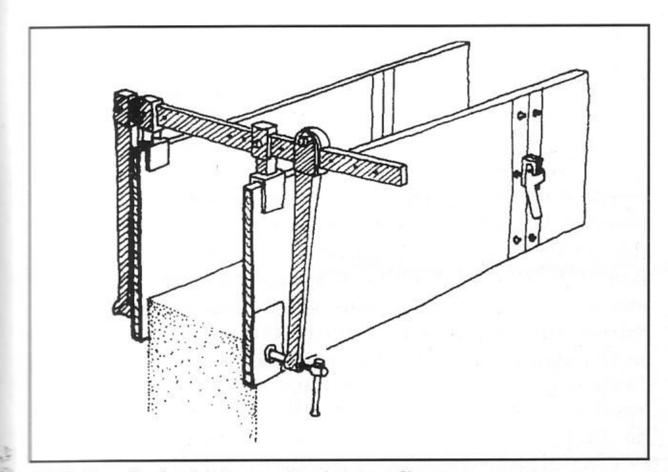
En comparación con técnicas en las que el barro se utiliza en un estado más húmedo (ver sección 9), la técnica del tapial brinda una retracción mucho más baja y una mayor resistencia. La ventaja en relación a las técnicas de construcción con adobe (ver sección 7), es que las construcciones de tapial son monolíticas y por ello tienen una mayor durabilidad.
Las técnicas de construcción de muros de tapial y construcción de cúpulas se describen en las siguientes secciones. Una técnica especial de barro apisonado sismoresistente reforzado con bambú se describe en la sección 14.13.4. Los pisos de barro apisonado se describen en la sección 14.4.

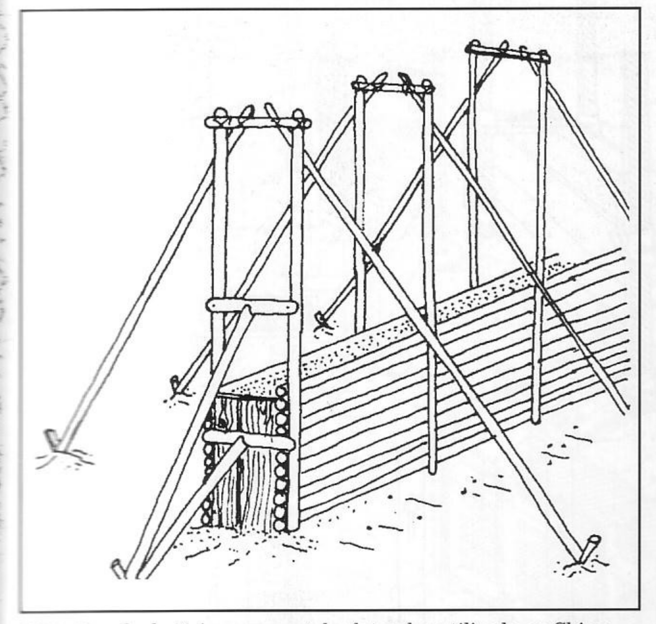
5.2 Encofrados

En los encofrados tradicionales, los tablones paralelos separados se unen por medio de travesaños (de un espesor considerable) que atraviesan el muro (Fig. 5.2-1), estos al desmoldar el elemento dejan espacios vacíos que posteriormente deben ser rellenados. Un sistema optimizando el espesor de los travesaños que penetran el muro (4 x 6 mm), fue desarrollado en el Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) (Fig. 5.2-2). Con el objetivo de eliminar totalmente esta desventaja se han desarrollado sistemas de encofrado sin travesaños (ver Fig. 5.2-3 y sección 5.6.1). Como se muestra en la Fig. 5.2-4 encofrados sin travesaños con

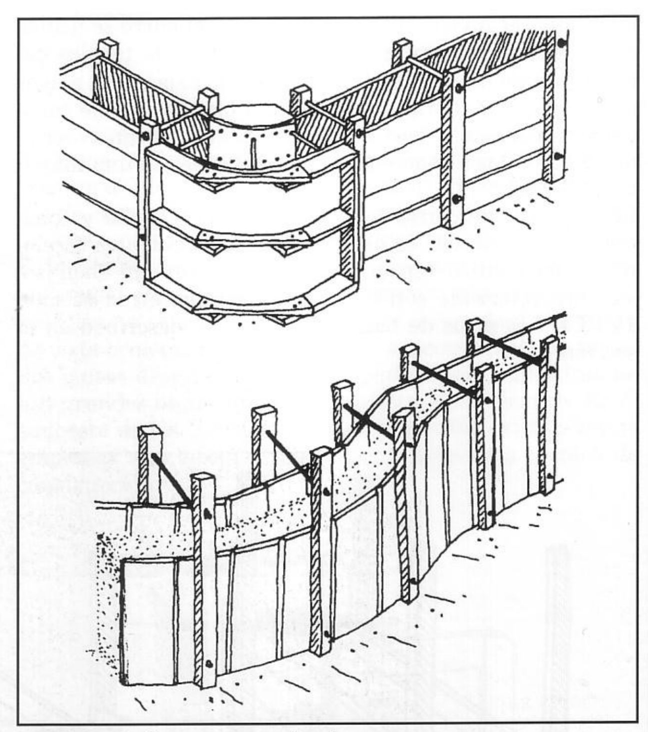


5.2-2 Encofrado ascendente, FEB (Minke, 1984)


5.2-3 Encofrado sin travesaños intermedios


5.2-4 Encofrado típico con puntales laterales utilizado en China

puntales laterales anclados requieren mucho espacio y obstruyen considerablemente la circulación en la construcción. Con encofrados especiales, es posible construir también esquinas redondeadas y muros curvos (Fig. 5.2-5). La Fig. 5.2-6 muestra un granero circular con muros de 90 cm de espesor, construido con tierra apisonada en 1931 en Bollbrügge, Alemania.
Encofrados comunes empleados en la construcción de elementos de hormigón pueden también ser utilizados pero generalmente son muy pesados y sus costos son elevados. En Europa, los tablones de 19 mm de espesor son comúnmente utilizados . Estos deben sujetarse con elementos verticales cada 75 cm. El encofrado debe ser rígido para evitar pandeos durante el proceso de apisonado. Por ello, es más económico emplear tablones de 35 a 45 mm de espesor, los mismos que requieren sujeciones tan solo cada 100 a 150 cm.
Si la mezcla es muy arcillosa, el encofrado no debe desmontarse directamente sino más bien debe deslizarse cuidadosamente sobre la superficie del elemento, para evitar que partículas de la mezcla se peguen al encofrado. Por ello, no es aconsejable utilizar tableros de superficies muy rugosas ni muy lisas.


5.2-5 Encofrado para muros circulares y curvos

Si no se optimiza el encofrado para estas técnicas, se invierte 30% del tiempo de ejecución en montar, ajustar y desmontar el encofrado. Por ello las siguientes recomendaciones deben ser tomadas en cuenta:

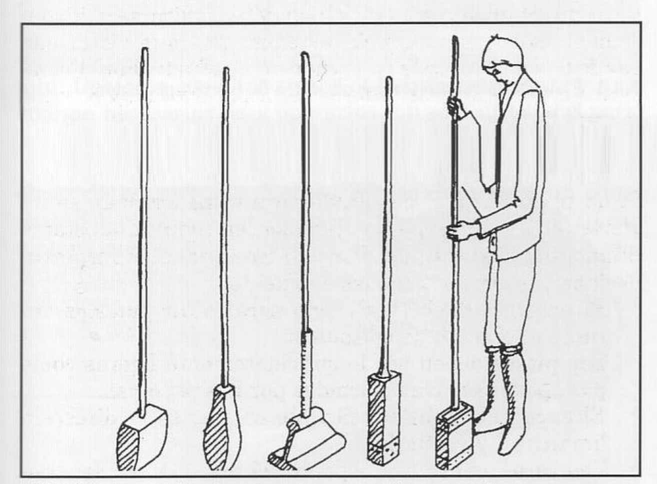
- El encofrado debe ser rígido para evitar pandeos durante el proceso de apisonado.
- Las piezas deben ser lo suficientemente ligeras como para poder ser transportadas por dos personas.
- El encofrado debe ser fácil de ajustar en la dirección horizontal y vertical
- Las variaciones en el espesor del muro deben ser controlables a través de una tolerancia específica.
- Es preferible que los esquinas no requieran encofrados especiales. Por ello el encofrado debe admitir variaciones en la longitud.

5.3 Herramientas

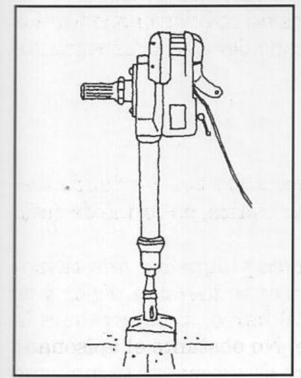
Antiguamente el barro se compactaba con herramientas manuales usando pisones de base cónica, en forma de cuña o de base plana (Fig.5.3-1).
Utilizando pisones de base cónica y aquellos que tienen forma de cuña, las capas del barro se mezclan mejor y se obtiene una mayor cohesión del barro, si se provee a la mezcla una humedad suficiente. No obstante el apisonado con este tipo de pisones requiere de un mayor tiempo que aquel ejecutado con pisones de base plana.



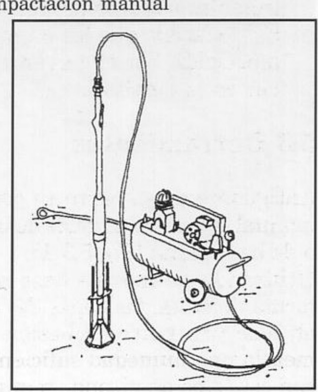
5.2-6
Granero circular, Bollbrügge, Alemania (1831)



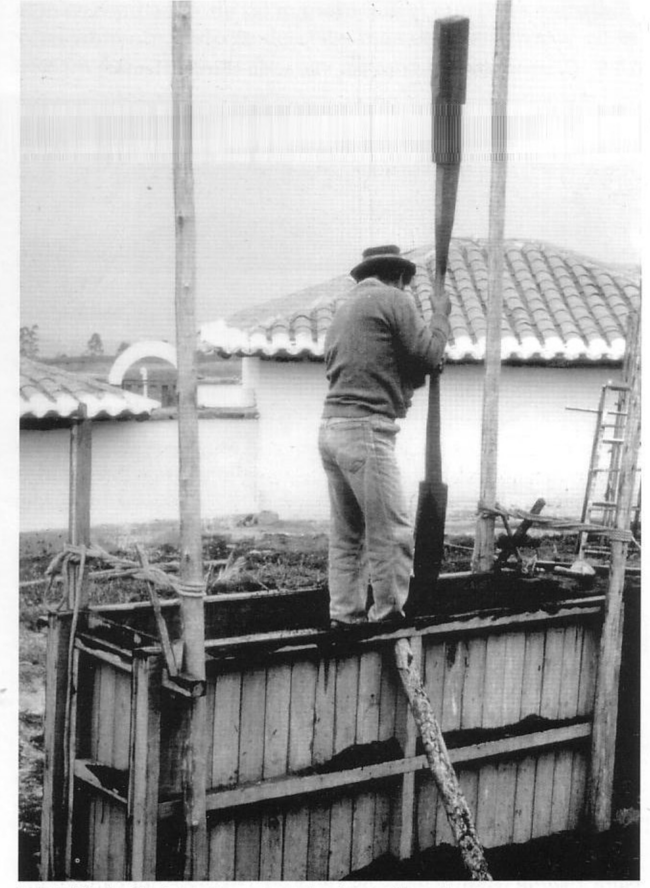
5.3-1 Pisones utilizados para compactación manual



5.3-3 Compactador eléctrico (Wacker)



5.3-4 Compactador neumático, Australia.



5.3-2 Pisón de dos cabezas empleado en Ecuador

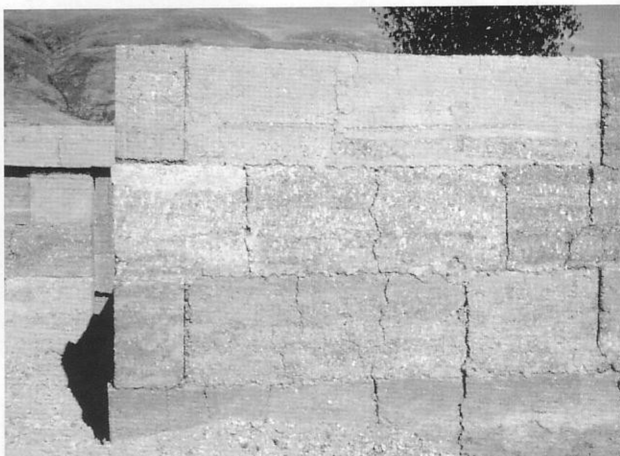


5.3-5 Compactadores neumáticos (Atlas-Copco)

Muros apisonados con pisones de base plana, muestran uniones laterales débiles y por ello deben soportar solo cargas verticales.
La base del pisón no debe tener una punta muy aguda, para que en el caso de que el encofrado sea de madera este no sea dañado por el pisón. La superficie de la base no debe ser menor a 60 cm² ni mayor a 200 cm². El peso de pisón debe ser de ser de entre 5 a 9 kg. Es preferible utilizar un pisón de dos cabezas con una cabeza redondeada en un lado y en el otro una cuadrada. Esto permite que se pueda utilizar el pisón del lado cuadrado para compactar las esquinas con efectividad y del lado redondeado para el



5.3-6 Compactador eléctrico por vibración (Firma Heuser)



5.4-1 Fisuras de retracción en un muro de barro apisonado, Ecuador

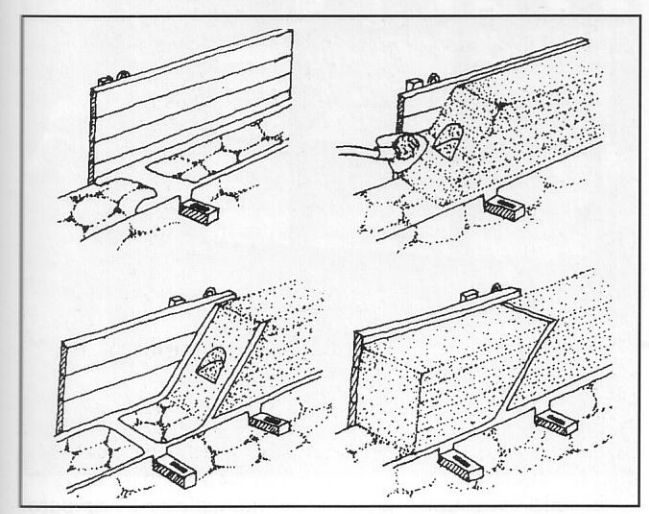


5.3-7 Compactador eléctrico de vibración (Heuser)



5.5-1 Barro apisonado cortado directamente después de quitar el encofrado

resto. Tales pisones son utilizados aún hoy en día en el Ecuador (Fig. 5.3-2).
En el segundo cuarto del siglo XX se utilizaron en Alemania, Francia y Australia compactadores eléctricos y neumáticos. El compactador eléctrico que se muestra en la Fig. 5.3-3 de la empresa alemana Wacker fue utilizado antiguamente en muchos proyectos de tierra apisonada y se ha escrito extensivamente al respecto. Este tiene una acción similar al martillo con un salto (altura de elevación) de 33 mm y una frecuencia de 540 golpes por minuto. Su efecto de compactación es muy efectivo. Su única desventaja es la dificultad de manipulación debido a que pesa 24 Kg. Esta herramienta ya no se fabrica.
En Australia se utilizó en los años 50 un compactador neumático (Fig. 5.3-4). Este funciona como un martillo neumático, tiene una frecuencia de 160 golpes/minuto y pesa aproximadamente 11 kg. Normalmente, los equipos comerciales de compactación de tierra utilizados para carreteras no son apropiados para el trabajo del barro apisonado, debido a que su frecuencia es muy alta y su salto es muy bajo. Las herramientas que solamente dan el efecto de vibrado son apropiadas para suelos arenosos, pero no son apropiadas para suelos arcillosos.
Los compactadores neumáticos que se muestran en la Fig. 5.3-5. son muy efectivos para los trabajos de barro apisonado. El compactador Ram II G producido por Atlas-Copco, es muy apropiado ya que tiene una cabeza fija que no rota debido a un elemento especial. Otra ventaja es que el pisón puede ser cambiado por uno rectangular para compactar las esquinas. Todos los compactadores ilustrados necesitan una presión de 6 bar y un flujo de aire de 0,4 a 0,9 m^3/min. Debido a sus altos costos, a la infraestructura y a la energía necesarias para operarlos son sólo utilizados para obras de gran escala. En el FEB, se desarrolló un compactador eléctrico por vibración (Figs. 5.3-6 y 5.3-7). Su motor tiene una frecuencia de 1000 a 1200 ciclos por minuto. La parte más importante de este equipo es la especial forma de la base, que le permite moverse por si mismo a través del encofrado durante el proceso de compactación.



5.4-2 La técnica francesa del *pisé*

Este equipo puede compactar tierra suelta en capas de 7 cm de espesor.

5.4 Proceso de construcción

En casi todas las técnicas tradicionales de barro apisonado, el encofrado se desmonta y se vuelve a montar horizontalmente paso a paso. Esto significa que la tierra es apisonada en capas de 50 a 80 cm de altura, formando una capa de muro a esta altura antes de que el encofrado sea movido. La capa superior de un muro de tapial siempre es más húmeda que la inferior ya parcialmente seca, por ello hay una retracción más alta en la capa superior. Lo que conlleva a la aparición de fisuras en la junta de los dos capas (Fig. 5.4-1).
Esto puede ser peligroso ya que el agua capilar puede filtrarse hacia estas juntas y quedarse allí, provocando humedecimiento y desintegración. Como se puede ver en la misma figura, también pueden aparecer fisuras verticales en estos muros.
En la técnica francesa de *pisé*, se resolvió este problema mediante la aplicación de una capa de mortero de cal sobre cada capa antes de ejecutar la siguiente. El mortero de cal tiene un proceso de curado que dura varias semanas y se mantiene plástico hasta que el barro haya dejado de retraerse; A veces incluso las juntas laterales entre los fragmentos se ejecutan con mortero de cal y con una inclinación (Fig. 5.4-2).
Otro método para evitar las fisuras horizontales de retracción es compactar de tal manera que el muro sea ejecutado verticalmente. Esto se describe más detalladamente en la sección 5.6.

5.5 Ejecución de vanos

Inmediatamente después de concluida la compactación se puede desmontar del encofrado. Al mismo tiempo, el barro apisonado puede perforarse raspando o cortando. Normalmente, para hacer aberturas se colocan dentro del molde piezas adicionales durante el apisonado que dejan definidos estos espacios. Sin embargo, con barro apisonado las perforaciones pueden hacerse con mucho menos esfuerzo utilizando un machete o alambre de púas como sierra. Esta técnica permite el modelado de jambas y umbrales como se muestra en la Fig. 5.5-1. Se debe mencionar que en este estado el barro apisonado ha adquirido suficiente resistencia para introducir clavos, estos se pueden clavar sin necesidad de hacer perforaciones con un taladro.

5.6 Nuevas técnicas para construcción de muros

5.6.1 Paneles de barro apisonado

Con el objetivo de prevenir las fisuras horizontales de retracción en las juntas verticales de las técnicas tradicionales de barro apisonado, se desarrolló en el FEB una nueva técnica para elaborar paneles de la altura de un piso con alturas de hasta 2,40 m mediante un proceso de compac-

5.6-1

5.6-1 Encofrado trepador para paneles de barro apisonado (FEB)

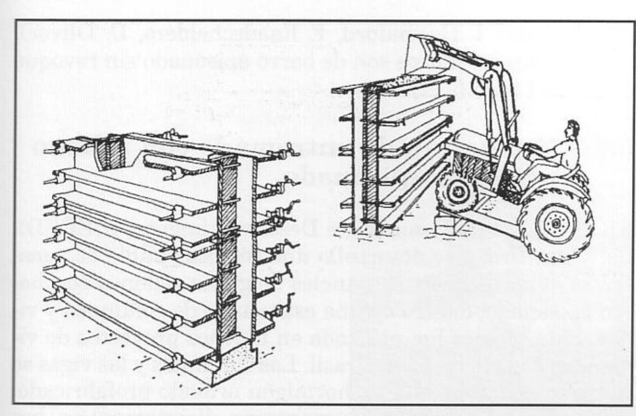


5.6-2



5.6-3

5.6-2, 5.6-3 Encofrado trepador para paneles de barro apisonado (FEB)


5.6-4 Encofrado (Rammed Earth Works, E.E.U.U.)


5.6-5 Casa experimental, Universidad de Kassel, Alemania, 1982

tación continua. Esta técnica evita las juntas horizontales formándose solamente juntas verticales que se sellan después del proceso de retracción. Para la estabilidad lateral las juntas verticales se ejecutan con un sistema de machihembrado. No aparecen fisuras de retracción en los paneles debido a sus pequeñas dimensiones. La junta actúa como una junta de retracción prediseñada.

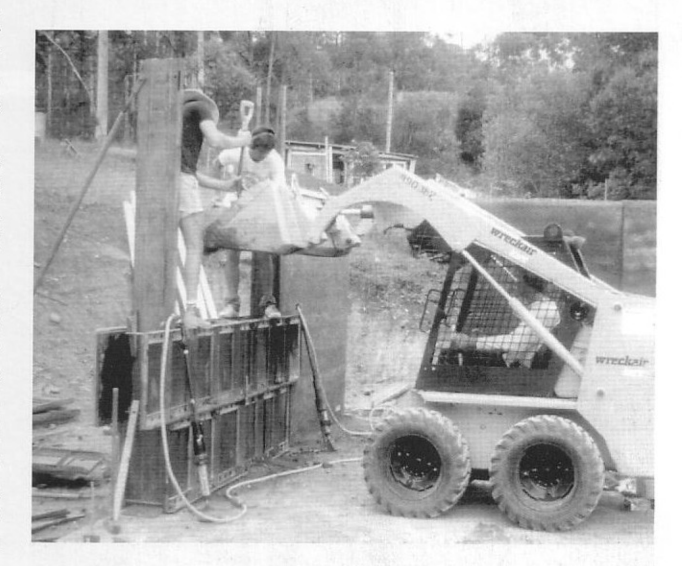
Para evitar un encofrado que necesite tener la altura de un piso se desarrolló en el FEB un encofrado trepador. La Fig. 5.6-3 muestra el diseño en acero, mientras que las Figs. 5.6-1 y 5.6-2 muestran un diseño en madera con el que el trabajo fue más sencillo.

Los dos elementos paralelos del encofrado se sujetan en la base por medio de una barra de acero que deja un hueco muy pequeño al desmontar el encofrado. En la parte superior del encofrado, el travesaño se encuentra por sobre el nivel del muro y no interfiere en el proceso de apisonado. Como se muestra en las figuras, es posible también utilizar una solución más simple con un travesaño de madera fijado a los elementos verticales formando así una unión o utilizar una versión más sofisticada de acero que asimismo permite ajustes precisos de la distancia en la parte superior.

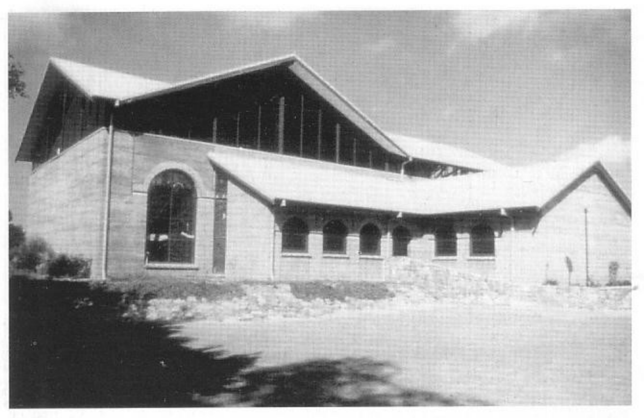
El primer edificio ejecutado utilizando esta técnica se construyó en la Universidad de Kassel en 1982 (Fig. 5.6-5). El suelo contenía aproximadamente 10% arcilla y 50% arena. La tierra fue apisonada con el compactador de vibración descrito en la sección 5.3. La retracción lineal de esos elementos fue solo de 0,4%. Luego del secado las juntas se rellenaron con barro estabilizado con 8% de aceite de linaza doblemente cocido. Un alero de 60 cm y un zócalo de 50 cm fueron suficientes para asegurar que el muro no se erosione por la lluvia y no requiera ningún tratamiento de superficie.

5.6.2 Técnicas altamente mecanizadas

La empresa Rammed Earth Works ha construido en California varias viviendas de barro apisonado, utilizando encofrados especiales de madera enchapada, como se muestra en la Fig. 5.6-4. La tierra se vierte en los moldes con una volqueta y se utiliza un compactador neumático. Esto significa que la mano de obra puede ser menor a 2 horas/m^3.




5.6-6, 5.6-7 Tapial mecanizado en proceso (Terrastone)



5.6-8

En Australia existen varias empresas que están también utilizando este tipo de proceso de construcción altamente mecanizado (Figs 5.6-6 y 5.6-7). Durante las últimas dos décadas más de 100 edificaciones han sido construidas en el país con barro apisonado (Oliver, 1986). Las Figs. 5.6-8 y 5.6-9 muestran una iglesia en Margaret River diseñada por los arquitectos Hodge & Wilson y construida por la empresa Ramtec. Como se ve en la figura 5.6-9, los muros e incluso las columnas que sostienen la estructura de la cubierta se construyeron con barro apisonado. En 1992 se construyó en Australia el Hotel Kooralbyn Valley Resort (Arquitectos: I. Hannaford, F. Raadschelders, D. Oliver), donde todos los muros son de barro apisonado sin revoque (Fig. 5.6-11 y 5.6-12).

5.6.3 Estructura de entramado con relleno de barro apisonado

En el Centro de Pesquisas e Desenvolvimento, (CEPED), Salvador, Brasil se desarrolló una técnica simple de construcción para construir paneles delgados rellenos con barro apisonado, dentro de una estructura de columnas y vigas. Esta técnica fue utilizada en muchos proyectos de viviendas de bajo costo en Brasil. Las columnas y las vigas se hicieron normalmente de hormigón armado prefabricado. Las caras del encofrado se montaron directamente sobre las columnas. Por ello, el espesor del muro fue el mismo que el de las columnas (Fig. 5.6-10). En este caso el barro se estabilizó con 6 a 8% de cemento, es decir que la mezcla era "suelo cemento".

5.6.4 Construcciones con encofrado perdido

Debido a que en las técnicas de construcción con barro apisonado el costo del encofrado es considerablemente elevado, seria en algunos casos preferible utilizar muros de menor espesor o utilizar elementos rígidos de madera que al mismo tiempo sirvan como encofrados perdidos. De esta manera se puede evitar el encofrado en uno o en ambos lados del muro.

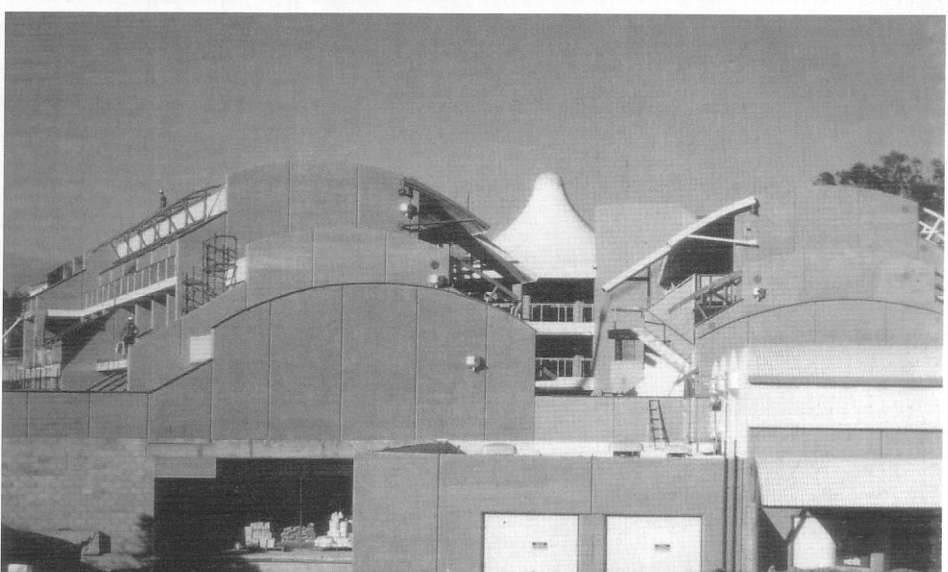


5.6-8, 5.6-9 Iglesia, Margaret River, Australia



5.6-10 Entramado de madera con relleno de barro apisonado (CEPED, Brasil)





5.6-11, 5.6-12
Hotel, Kooralbyn, Australia

Es adicionalmente ventajoso si este encofrado puede además contribuir a un incremento substancial del aislamiento térmico.
La rigidez de estos encofrados perdidos, debe ser suficiente para resistir los impactos laterales durante el proceso de apisonado. La Fig. 5.6-13 muestra secciones horizontales de un muro exterior. Las dos primeras muestran un muro ejecutado hacia el interior con adobes o bloques de suelo y hacia el exterior con barro apisonado alivianado con minerales, sobre el que se aplica directamente el revoque. En este caso el encofrado es necesario solo para la cara exterior. En el segundo caso se obtuvo una mejor rigidez de la sección interior del muro debido a que el aparejo utilizado para la disposición de los adobes o bloques de suelo crea una unión entre estos y el barro apisonado.
En la sección que se muestra a la derecha, el encofrado perdido se encuentra en la cara exterior del muro y está ejecutada con bloques de suelo alivianado. En la Fig. 5.6-14 se muestran secciones verticales de muros exteriores con encofrado perdido en ambas caras. La cara interior se puede hacer de adobes o bloques de suelo, elementos prefabricados de barro, tableros de madera contrachapada, tableros de yeso reforzado con fibras o tableros de chips de madera aglomerada con cemento o magnesita. Se puede lograr una protección contra las inclemencias del tiempo mediante revoques, revestimientos de albañilería o revestimientos de madera con una cámara de aire.

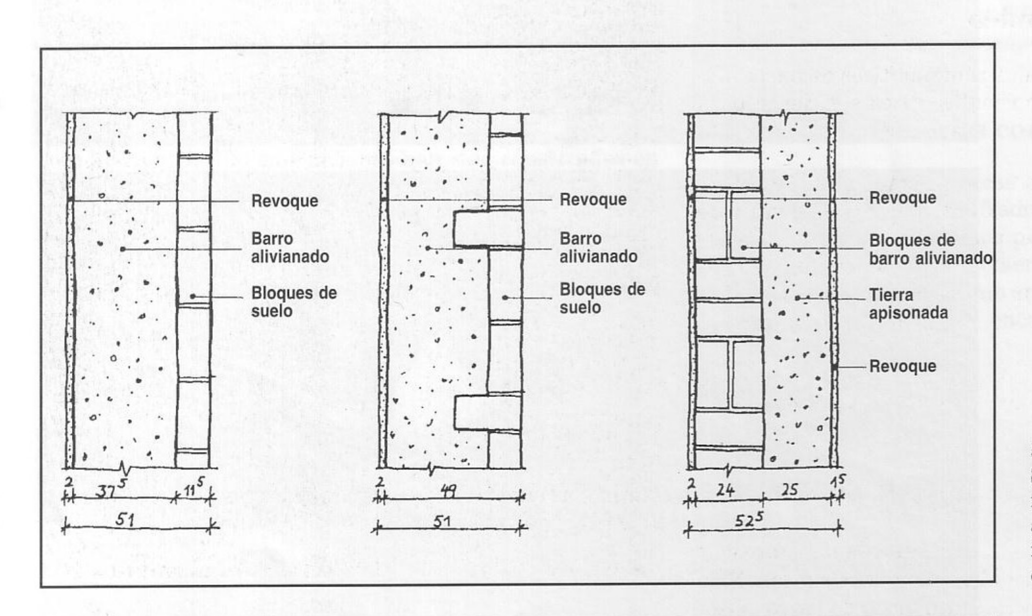
5.7 Cúpulas de barro apisonado

La primera cúpula de barro apisonado se construyó en Kassel en 1983, utilizando una técnica especial desarrollada por el FEB. Se trata de un encofrado rotatorio en el que se apisona la tierra (Figs. 5.7-1, 5.7-2, 5.7-3)
El espesor de la cúpula fue de 18 cm en la base y 12 en la parte superior. Las muros de 6 caras en el exterior y 12 caras en el interior también se hicieron de barro apisonado. Los contrafuertes están integrados a los muros. El moldeado de forma de la parte superior de los contrafuertes así como las ventanas se hizo con un cuchillo luego de desmontar el encofrado. La tierra se compactó en el molde utilizando el vibrador descrito en la sección 5.3 y también a mano.

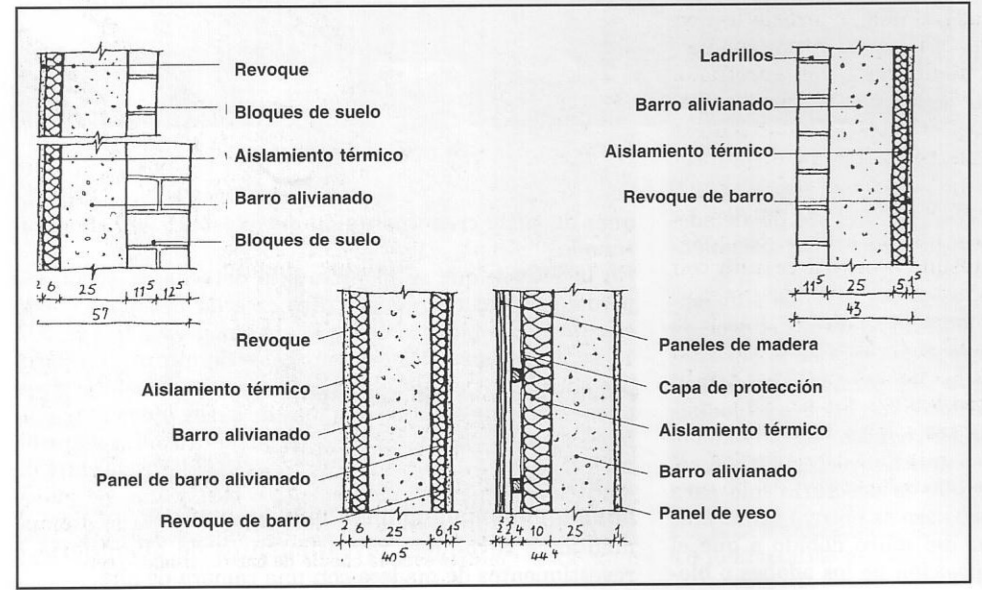
El encofrado de la cúpula en si mismo no solo fue diseñado para que pudiera ser deslizado hacia el centro, capa por capa, sino también tiene una guía que ajusta automáticamente el radio y la inclinación del encofrado. (Fig. 5.7-3).

5.8 Proceso de secado

No es posible establecer el momento en el que un muro de barro está seco, pero siempre su proceso de secado es más rápido que el de uno de ladrillos y uno de hormigón (sección 2.3.9). Si el clima es seco y caliente y si hay suficiente movimiento de aire, el proceso de retracción concluye después de algunos días. Luego de tres semanas el muro al tacto se siente totalmente seco, pero el contenido de agua es todavía elevado en relación al equilibrio de humedad.



5.6-13
Secciones horizontales de muros de barro apisonado alivianado con una cara interior de bloques actuando como encofrado perdido.



5.6-14
Secciones verticales de muros de barro apisonado con encofrado perdido en ambas caras

5.9 Mano de obra

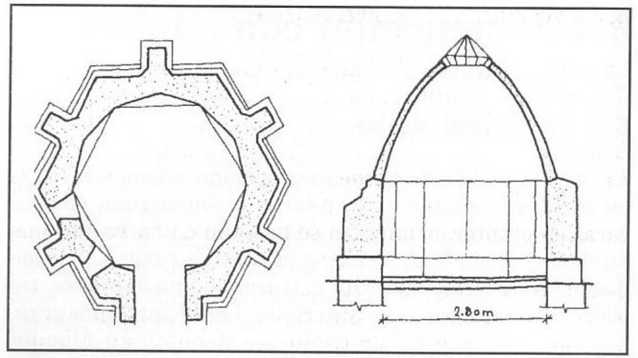
La mano de obra en las técnicas tradicionales de barro apisonado, ejecutadas a mano, incluyendo la preparación, el transporte y la construcción, son de 20 a 30 h/ m³.
Optimizando el sistema de encofrado y utilizando los compactadores eléctricos de vibración descritos en la sección 5.6-1, la mano de obra disminuye a 10 h/ m³. Con técnicas altamente mecanizadas, explicadas en la sección 5.6.2, en las que el transporte y el relleno del encofrado es ejecutado por volquetas y el compactado mediante pesados compactadores neumáticos, la mano de obra puede reducirse a 2 h/ m³, valor que es solo 10 % del necesario para las técnicas tradicionales y es significativamente menor a las técnicas de albañilería.

5.10 Aislamiento térmico

El aislamiento térmico de muros monolíticos de barro apisonado utilizando suelos normales no es suficiente para lograr los niveles requeridos de aislamiento térmico en climas fríos.
El valor U de un muro de barro apisonada de 30 cm de espesor es de 1,9 a 2,0 W/ m²K. Para alcanzar el valor de 0,5W/ m²K, requerido en muchos países europeos se requiere un espesor de 1,6 a 1,8 m. Por ello, en climas fríos se debe utilizar ya sea un muro de mayor espesor de barro alivianado o utilizar aislamiento térmico convencional adicional.
Algunos posibles métodos de construcción de muros de barro con un adecuado aislamiento térmico se describen en la sección 14.2.1.

5.11 Tratamientos de la superficie

Un muro de barro apisonado necesita menos trabajo y material que aquellos construidos con otras técnicas. Normalmente no es necesario revocar un muro de barro apisonado. Se puede obtener fácilmente una superficie lisa en la que se puede aplicar pintura, frotando la misma con fieltro inmediatamente después de desmontar el encofrado. Si una superficie exterior tratada con esta técnica, se protege de la lluvia con un alero y de las salpicaduras de la lluvia con un zócalo, entonces un revestimiento de pintura es suficiente protección hacia las inclemencias del tiempo. De barro apisonado en comparación con otras paredes de barro, requiere muy poco material para la terminación superficial. Generalmente no resulta necesario revestir con revoque una pared de barro apisonado. Es posible obtener una superficie lisa en condiciones de pintar y tapizar si acabada de desencofrar la pared se frota con fieltro. Si la pared se ha secado, entonces es necesario humedecerla antes del frotado. Si la pared se protege con un alero contra aguaceros y con zócalo contra salpicaduras, entonces resulta suficiente una pintura contra las inclemencias del tiempo. Se debe tener cuidado para que la pintura no tenga rajaduras, ni se pele.



5.7-1 Cúpula experimental de barro apisonado, Universidad de Kassel, Alemania, 1983





5.7-2. 5.7-3 Construyendo la cúpula de barro apisonado con un encofrado rotatorio

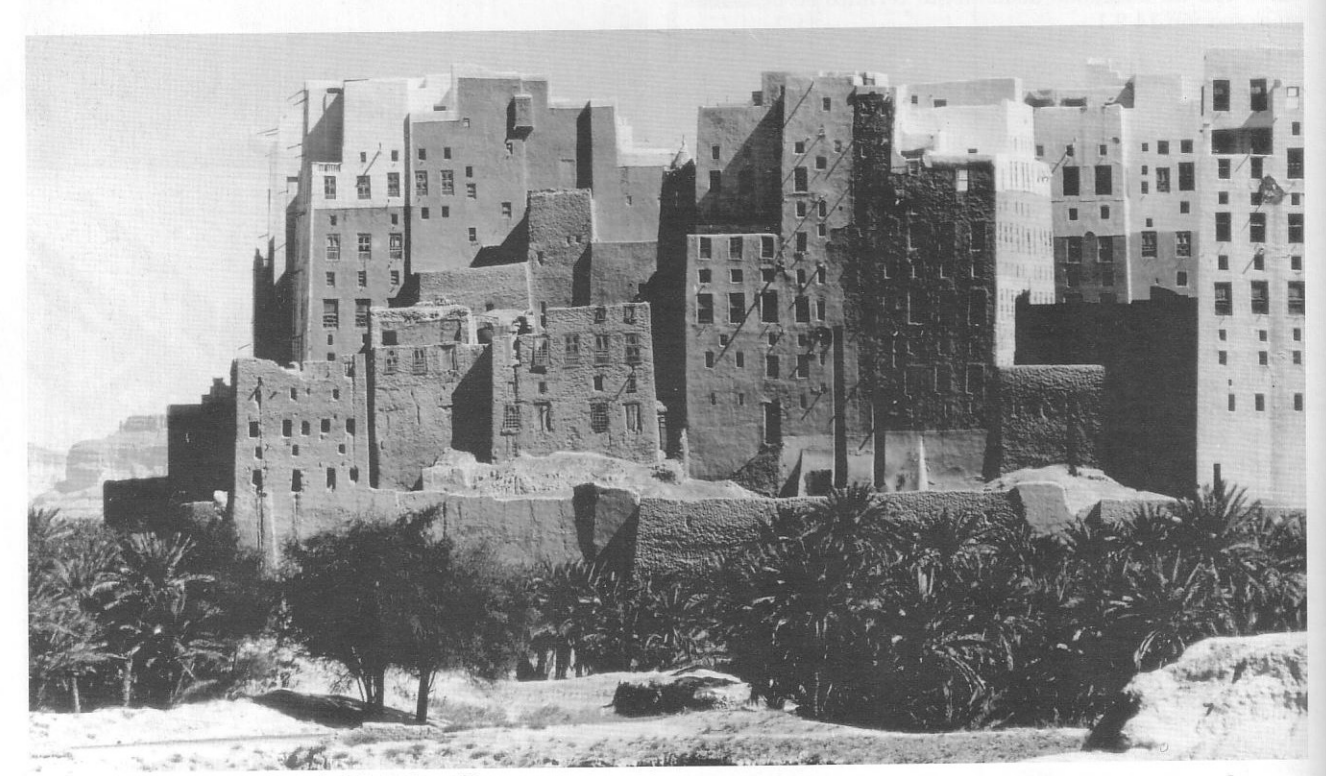
6. Construcción con adobes

6.1 Generalidades

Los bloques de barro producidos a mano rellenando barro en moldes y secados al aire libre se denominan adobes. Cuando la tierra húmeda se compacta en una prensa manual o mecánica se denominan bloques de suelo. Los ladrillos producidos mediante un extrusor en una ladrillera, sin cocer se denominan ladrillos crudos. Los bloques más grandes compactados en un molde se denominan bloques compactados o adobones.
Algunos países tienen medidas estandarizadas para estos bloques.
La aplicación específica de estos diferentes tipos de bloques en muros, pisos, bóvedas y cúpulas se describe en las secciones 14.2, 14.3 y 14.7.

6.2 Historia

La construcción con adobes o bloques de suelo se extendió por todos los climas cálido-secos, subtropicales y templados del planeta. Se encontraron en Turquestán Rusia construcciones de adobe que datan del 8000 al 6000 a.C. (Pumpelly, 1908) y en Asiria del 4000 a.C. En el norte de Egipto, pueden hoy aún verse estructuras monumentales de 3200 años de antigüedad, como por ejemplo los enormes muros de bloques de tierra de la fortaleza de Medinet Habu y las bóvedas del templo mortuorio de Ramses II en Gourna (Fig. 1.2-1).
El arte de construir bóvedas y cúpulas con adobes y sin encofrados se extendió mucho en las culturas antiguas (ver sección 14.7).
Durante siglos, los indios Pueblo en Taos, Nuevo México, USA, construyeron sus viviendas con adobes, utilizando la tierra del lugar, el agua de los ríos cercanos y la paja de sus cosechas de cereales (Fig. 6.2-2).
El centro histórico de la cuidad de Shibam, Yemen, que abarca aproximadamente 20000 m² y al que solo se accede a través de una puerta, esta construida completamente en adobe. La mayoría de las viviendas alcanzan ocho pisos de altura y datan del siglo XV (Fig. 6.2-1).
En Escandinavia e Inglaterra, la construcción con tepes (en ingles sod) fue muy común en los siglos XVII y XVIII. La técnica consiste en extraer los bloques de tierra con raíces de la ultima capa de un suelo arcilloso sobre el que crece hierba. Para construir los muros, los tepes se colocan con la hierba hacia abajo en hiladas sin utilizar mortero. Esta técnica fue llevada por emigrantes europeos a los Estados Unidos, donde se construyeron muchas viviendas con esta técnica en los siglos XVIII y XIX (Fig. 6.2-3). Algunos también adoptaron este sistema de construcción con tepes,



6.2-1 Centro histórico de la ciudad de Shibam, Yemen

de tribus indias como por ejemplo de los Omaha y Pawnee, que techaban sus chozas circulares con esta técnica. (Houben, Guillaud, 1984).
En Nuevo México se utilizan para la construcción, bloques limosos extraídos de las orillas de los ríos. Los bloques contienen raíces que actúan como refuerzo. Estos bloques se denominan *terrones* o *tirrones* y fueron algunas veces también utilizados en América Central y en México. Se debe recalcar que este sistema constructivo está incluido en las Normas de construcción de Nuevo México.
En Alemania se utilizó la construcción con adobes desde el siglo VI siglo a.C. Adobes de 40 cm x 40 cm, de 6 a 8 cm de altura fueron utilizados en la construcción del fuerte de Heuneburg próximo al lago Constance (Dehn, 1964). Para los muros de 3 m de altura se emplearon 140 000 bloques y 400m^3 de mortero (Güntzel, 1988, p.23).
Una circular oficial sobre la introducción al uso del adobe en la construcción de muros se publicó en 1764 (Güntzel, 1988, p23). David Gilly publicó manuales sobre la construcción con adobes en 1787 y 1790.

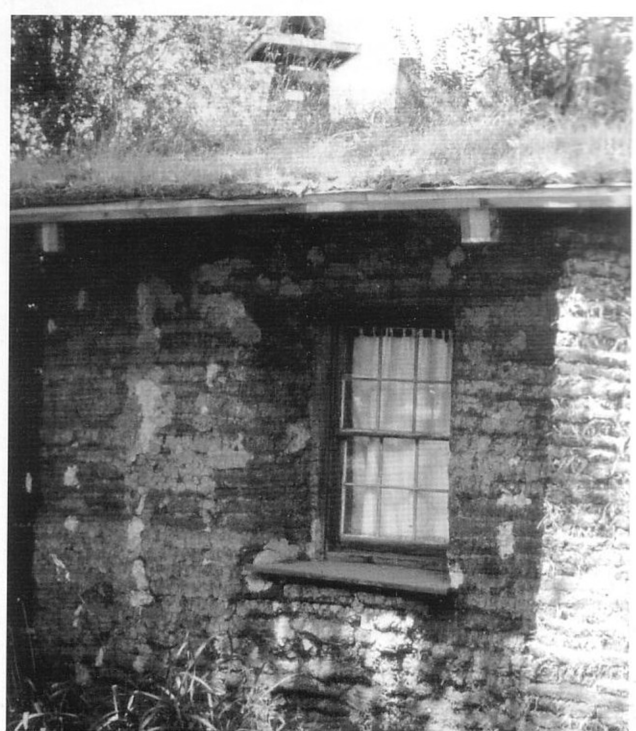
6.3 Elaboración de adobes

La elaboración de los adobes se realiza ya sea rellenando los moldes con un barro de consistencia pastosa o lanzando un barro menos pastoso en el molde. Se emplean diferentes tipos de moldes como se muestra en la Fig. 6.3-1. Por lo general son de madera. La elaboración se ve en las Figs. 6.3-3 a 6.3-5. En la técnica del lanzado se mezcla barro arenoso con agua, usualmente se añade paja cortada y se lanza la mezcla con fuerza en el molde, mientras más fuerte se lance el barro en el molde mejor serán la compactación y la resistencia. La superficie se uniforma con la mano, una madera, una paleta o alambre (Fig. 6.3-2).
Una persona puede elaborar aproximadamente 300 adobes por día, incluyendo la preparación de la mezcla, el transporte y el apilado. En India una persona puede producir más de 500 adobes por día utilizando un molde doble y un tamaño más pequeño.

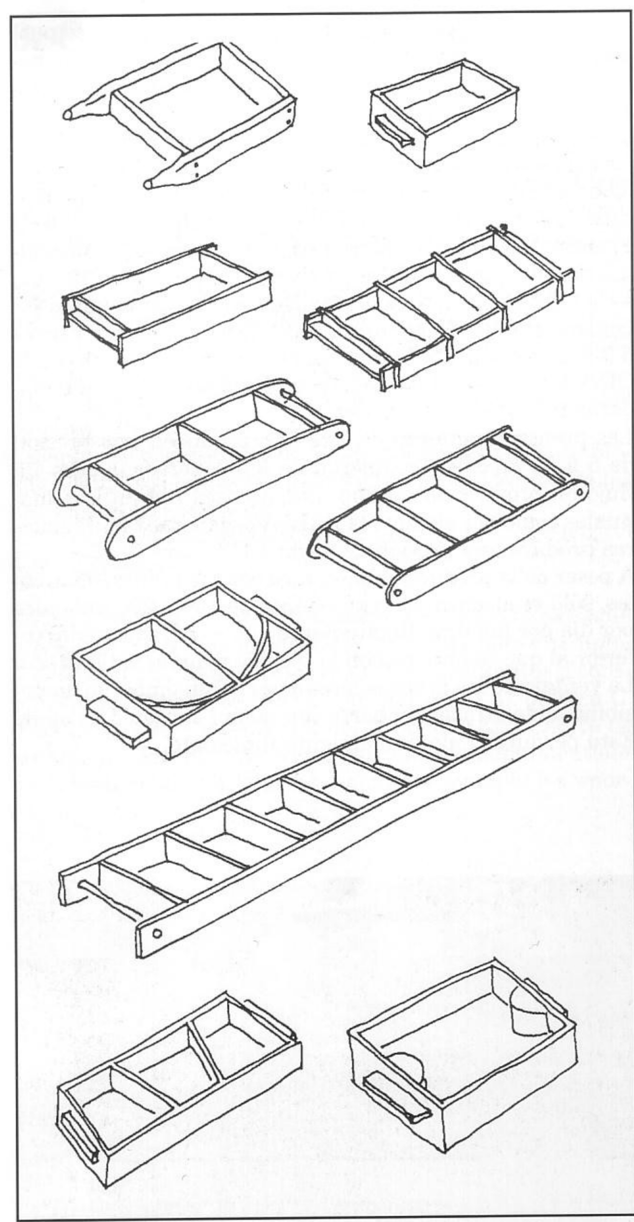
Con el objetivo de facilitar el trabajo de los adobes se pueden elaborar sobre una mesa como tradicionalmente se hacia en Alemania (Fig. 6.3-6). Otro método sencillo es utilizar moldes con agarraderos de 80 cm de largo permitiéndole al obrero trabajar en posición erguida (Fig. 6.3-7).
La elaboración de adobes con prensas manuales es conocida en Europa desde el siglo XVIII. La primera prensa manual fue desarrollada en 1789 por el arquitecto francés François Cointeraux. Diferentes prensas han sido construidas desde entonces. La mejor prensa conocida en el mundo es la CINVA-Ram, fue desarrollada en Colombia por el ingeniero chileno Ramírez en 1952 (Fig. 6.3-8). La Figura 6.3-9 muestra la CETA-Ram operando. Esta es similar a la CINVA-Ram, fue desarrollada en Paraguay y permite elaborar tres unidades a la vez.
Las prensas manuales de este tipo producen una presión de 5 a 25 kg/cm^2 y requieren de 3 a 5 personas para un flujo de producción óptimo. Las prensas hidráulicas manuales como por ejemplo la BREPAC elaborada en Inglaterra produce una presión de hasta 100 kg/cm^2.
A pesar de la producción mecánica con las prensas manuales, sólo se alcanza un rendimiento de 150 a 200 unidades por día por hombre. Rendimiento que es notablemente inferior al que se obtiene con la técnica manual del lanzado. La ventaja de las prensas mecánicas es sin embargo, la posibilidad de utilizar un barro con menor cantidad de agua. Esto permite el almacenamiento inmediato.



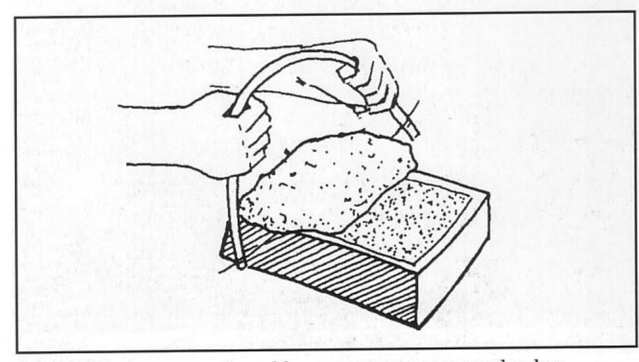
6.2-2 Viviendas tradicionales de tierra de los Indios Pueblo, Taos, Nuevo México, Estados Unidos



6.2-3 *Sod house,* vivienda construida con tepes, US



6.3-1 Moldes para adobes

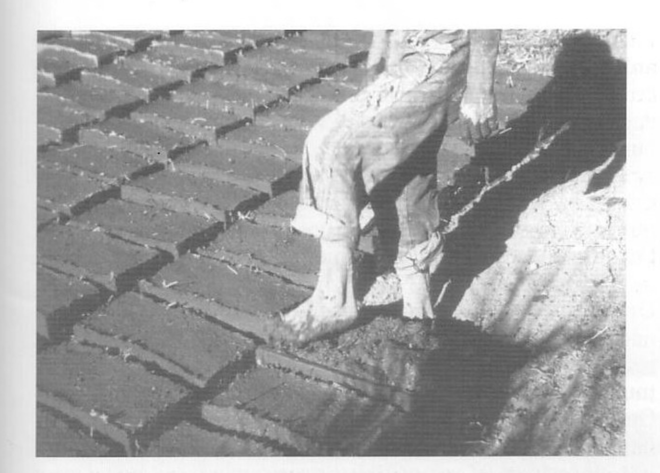


6.3-2 Método para quitar el barro restante con un alambre

La desventaja es la necesidad de estabilización con cemento entre 4 a 8% para obtener una resistencia suficiente, puesto que la capacidad aglomerante de la arcilla no puede ser activada con tan bajo contenido de agua. Asimismo, debido a la ausencia de amasado y batido no se activan las fuerzas aglutinantes de los minerales de arcilla. Sin cemento los bloques prensados tienen una resistencia a la compresión menor que los adobes hechos a mano (ver sección 4.5-3).
Otra desventaja de la producción con prensas reside en la necesidad de preparar las mezclas con humedad y composición constantes. Si la composición varia, la cantidad de mezcla a ser llenada y la presión cambian, lo que conlleva a variaciones de la altura y la resistencia de los bloques.
Las prensas completamente automáticas (Fig. 6.3-10, 6.3-11) pueden producir de 1500 a 4000 bloques por día. Sin embargo, son más costosas y son difíciles de reparar. Estas máquinas requieren además una mezcladora y una trituradora que aseguren una mezcla constante.
Las prensas completamente automáticas sólo resultan económicas si tienen una larga vida, bajo una explotación extensiva y si la materia prima está disponible en suficiente cantidad. Por otra parte los costos de amortización, reparaciones y mantenimiento reducen rápidamente esta supuesta economía.
En países en vías de desarrollo donde la mano de obra tiene un costo menor, la producción manual de adobes es más económica, en cambio en países desarrollados la producción industrial de ladrillos crudos es más económica. (Para más información sobre bloques de suelo comprimido ver Mukerji, 1986, Smith and Webb, 1987, Mukerji, 1988, y CRATerre, 1991).
Más sencillo y eficiente parece ser el equipo para elaboración de adobes desarrollado y patentado en 1946 por Hans Sumpf en Estados Unidos (ver Fig. 6.3-12 y 6.3-13) . Se mezcla el barro en una mezcladora de fuerza hasta obtener una consistencia pastosa y luego se vierte con ayuda de un embudo que se mueve sobre una rejilla de moldes. Los moldes se rellenan y la parte superior se uniforma automáticamente. Una palanca sube la rejilla dejando los bloques separados para secar. Luego de un tiempo de secado preliminar, los bloques se pueden voltear colocándolos de lado para que el secado sea uniforme.
En las ladrilleras industriales la tierra triturada se mezcla e introduce mediante rodillos en un extrusor donde se mezcla nuevamente y se presiona a través de una boquilla operada al vacío obteniendo elementos que luego se cortan con un alambre. El secado se efectúa en hornos utilizando combustibles. Ya que en las ladrilleras todo el proceso de producción es computarizado es más difícil solicitar ladrillos crudos y los precios son a veces mayores que los de un ladrillo cocido. Por otra parte con un simple proceso de secado al aire libre fue posible al menos en un caso en Alemania obtener ladrillos crudos 40% más baratos que los cocidos.
La Fig. 6.3-14 muestra el método tradicional de secado al aire libre en ascensores.

6.4 Dosificación de la mezcla

El barro utilizado en las ladrilleras industriales requiere un alto contenido de arcilla con el objetivo de alcanzar su-

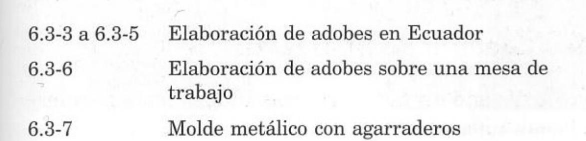








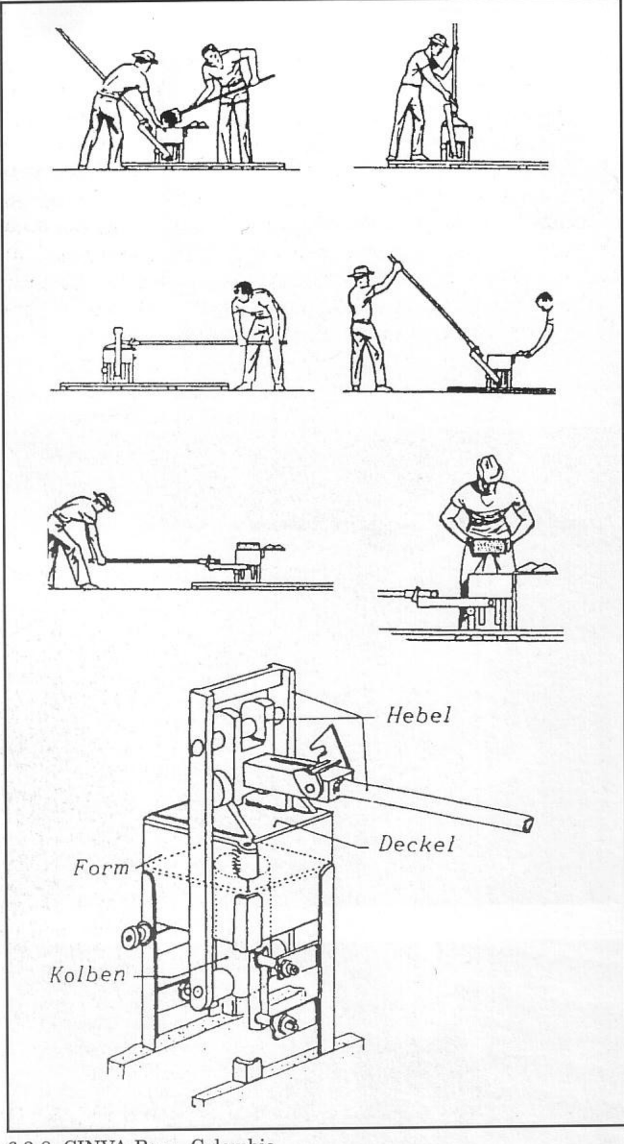




6.3-3 a 6.3-5 Elaboración de adobes en Ecuador

6.3-6 Elaboración de adobes sobre una mesa de trabajo

6.3-7 Molde metálico con agarraderos



6.3-8 CINVA-Ram, Colombia

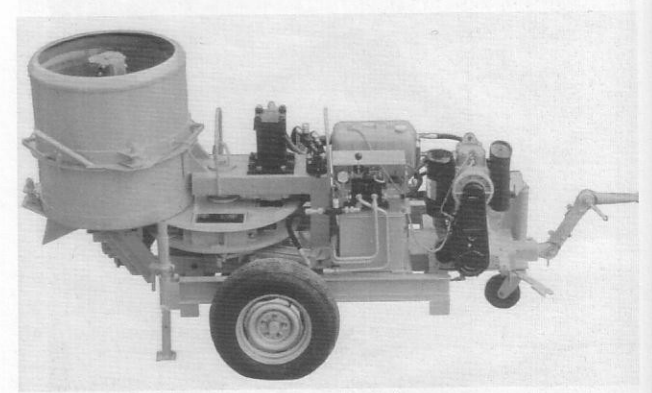


6.3-9 CETA-Ram, Paraguay

ficiente resistencia luego de ser quemado. La Fig. 6.4-1 muestra una distribución granulométrica típica de un barro que contiene 24% de arcilla, 50% limo, 23% arena y 3% de grava. Cuando un barro de estas características se emplea para la elaboración de ladrillos crudos industriales, se producen problemas de expansión y retracción al mojarse y secarse respectivamente. La Fig. 6.4-3 muestra fisuras que aparecieron en estos ladrillos crudos industriales después de sacarse al de ser mojados por lluvia durante la construcción.

Una curva de distribución granulométrica optimizada para adobes o bloques de suelo se muestra en la Fig. 6.4-2. Esta señala 14% arcilla, 22% limo, 62% arena y 2% grava y no muestra fisuras de retracción al secarse.

Generalmente se puede afirmar que los adobes deben tener suficiente arena gruesa que le permita alcanzar una alta porosidad (y por eso alta resistencia a las heladas) y alta resistencia a la compresión con un mínimo de retracción. Pero a la vez deben contener suficiente arcilla para tener una buena cohesión que permita la manipulación de los adobes.



6.3-10 Prensa automática CLU 3000, Suiza



6.3-11 Prensa automática (Pacifica Adobe, USA)

6.5 Ejecución de muros

En el sitio es importante proteger los adobes de la lluvia. Normalmente en los países desarrollados los ladrillos crudos solicitados llegan a la obra sobre estructuras de madera y totalmente cubiertos por plástico. Los adobes se unen con mortero de barro, de cal hidráulica o altamente hidráulica. Se puede añadir pequeñas cantidades de cemento a esta mezcla pero mezclas únicamente de cemento no son aconsejables pues son muy rígidas y provocan fisuras. Con el objetivo de evitar fisuras de retracción en el mortero durante el secado este debe contener suficiente arena gruesa. El contenido de arcilla puede variar de 4% a 10%. La formación de fisuras de retracción puede evitarse también si la capa de mortero es delgada. Es un placer trabajar con mortero de barro ya que este no es abrasivo a la piel. En cambio, el mortero de cal daña la piel y puede provocar alergias.

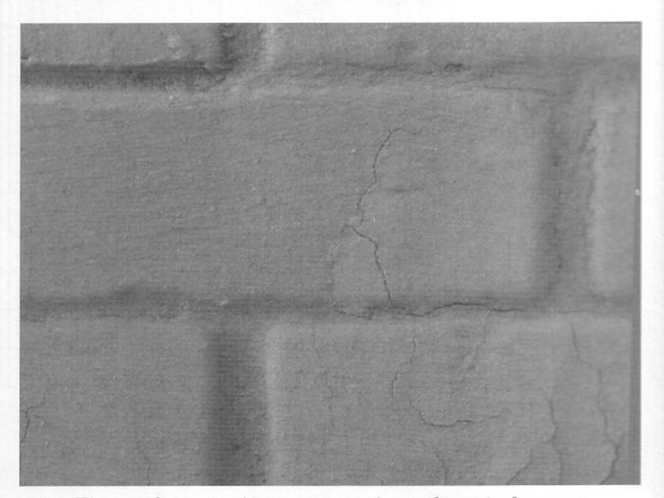




6.3-12, 6.3-13 Técnica de elaboración de adobes desarrollada por Hans Sumpf, USA



6.3-14 Secado de ladrillos crudos al aire libre en una ladrillera, Alemania



6.4-3 Fisuras de retracción que aparecieron después de secar adobes industriales que fueron mojados por la lluvia



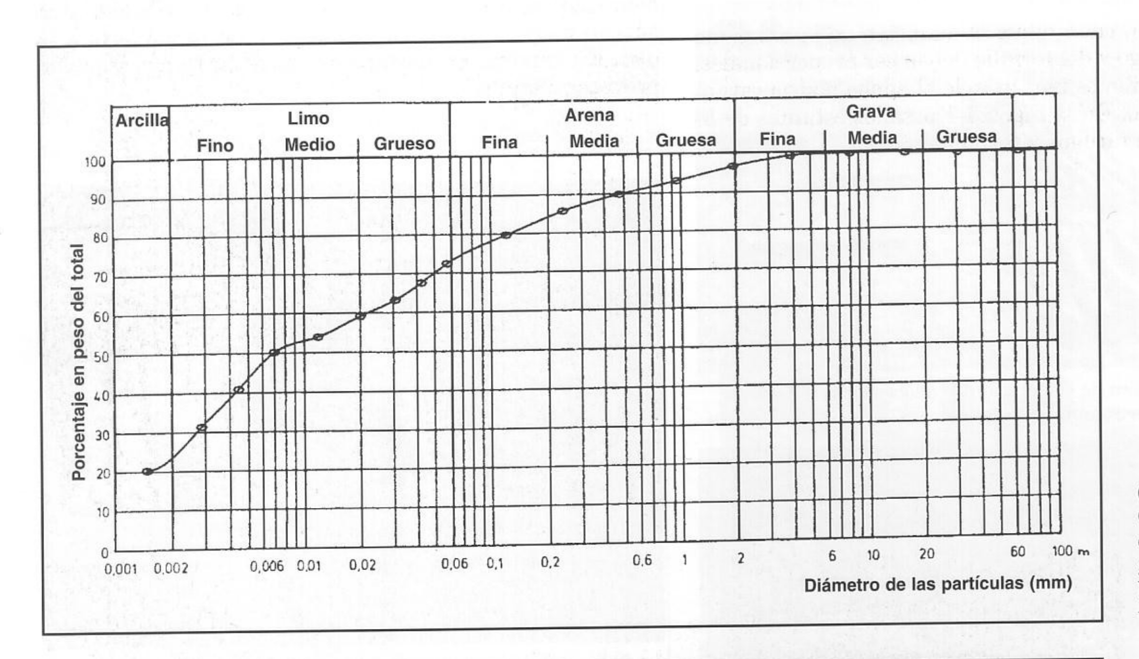
6.5-1 Cortado de bloques de suelo con serrucho

Es posible construir muros de adobe prescindiendo del mortero, si los adobes se sumergen en agua unos minutos antes de su colocación, para que las superficies se ablanden. Los adobes reblandecidos se colocan y se aprietan unos contra otros, de modo que luego de secados queden pegados. Este método requiere mucha práctica y destreza, pues es difícil colocar las piezas con exactitud controlando las juntas horizontales y el patrón, ya que no hay la tolerancia que usualmente da el mortero. Por ese motivo no tiene mucho sentido emplearla en adobes producidos manualmente debido a la desigualdad de tamaños y ausencia de superficies planas.

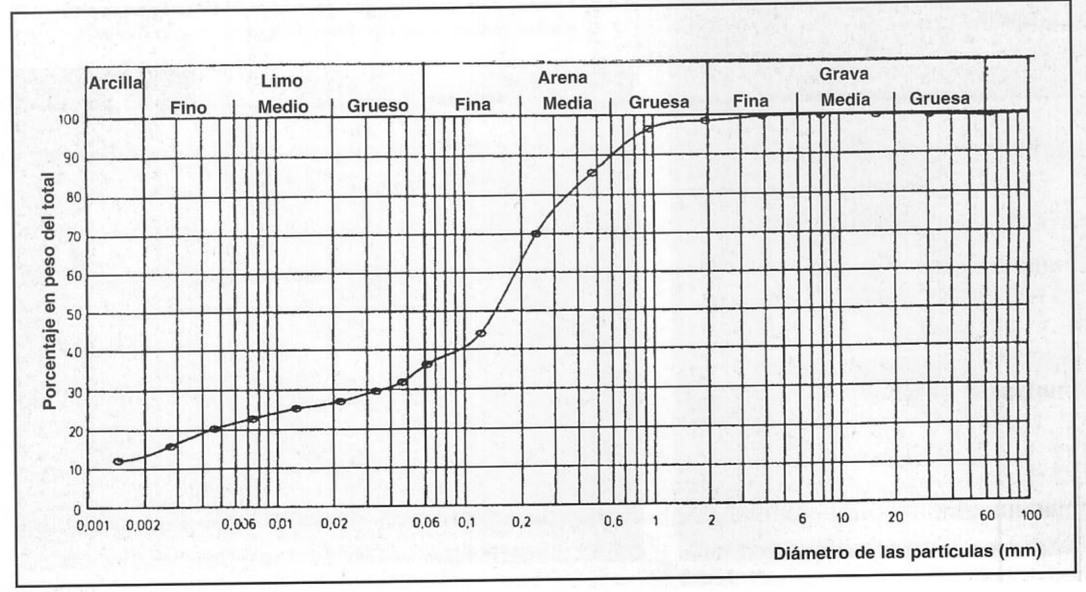
Los ladrillos crudos pueden cortarse más fácilmente que los cocidos. Se pueden cortar por ejemplo utilizando un serrucho, como se observa en la Fig. 6.5-1. Si se requieren pedazos pueden cortarse con el serrucho haciendo una hendidura de 2 cm en el adobe y luego se rompe con un golpe de martillo. En vez de utilizar un serrucho se puede hacer una hendidura con un badilejo, un cuchillo o un destornillador.

6.6 Tratamiento de superficie

La mampostería de adobes vistos con superficies o juntas irregulares puede uniformarse fácilmente si se humedece con un paño de fieltro. Un revoque no es recomendable debido a que interfiere en la posibilidad del muro de balancear la humedad interior del aire (ver sección 1.4.4). En



6.4-1
Curva de la distribución granulométrica del barro utilizado en una ladrillera



6.4-2
Curva de distribución granulométrica optimizada para adobes

lugar de este se puede aplicar al muro de adobes vistos una capa de lechada de barro estabilizada con cal o con cal-caseína u otros. (Fig. 6.6-1). (Para más detalles sobre el tratamiento de las superficies ver sección 12.3)

6.7 Fijación de elementos en los muros

Es más fácil introducir clavos en adobes que en ladrillos. Mientras más húmedo y poroso el material, más fácil será introducir un clavo. Los ladrillos crudos industriales son más propensos a las rajaduras que los adobes elaborados a mano. En el caso de clavos gruesos se recomienda taladrar previamente el hueco. En muros de barro es perfectamente posible colgar estantes o armarios con tornillos y tarugos.
Se debe tomar en cuenta que el diámetro de la broca del taladro, del tarugo y del tornillo deben ser proporcionales, ya que si el tornillo es más grande el adobe podría reventar al atornillarlo. En la Fig. 6.7-1 pesados estantes de libros cuelgan con tarugos y tornillos.



6.7-1 Estante de libros fijado a un muro de adobes



6.6-1 Muro de adobes vistos y acabado con una lechada de barro y cal, Bendigo, Australia

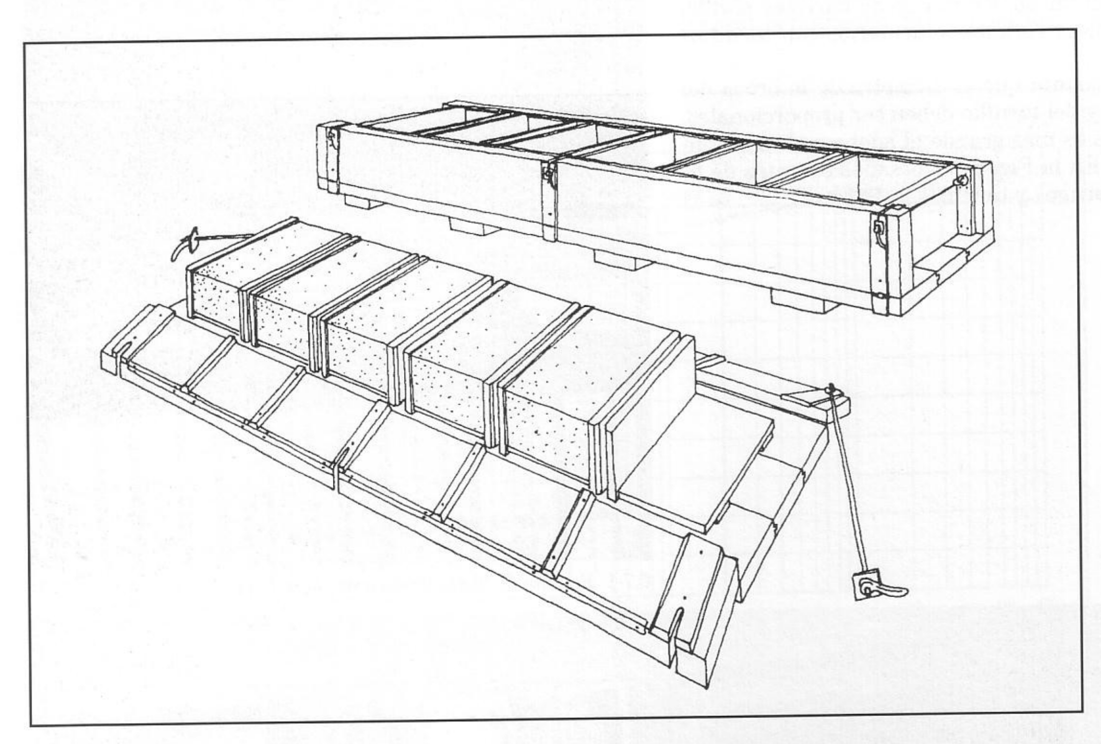
7. Adobones y paneles prefabricados

7.1 Generalidades

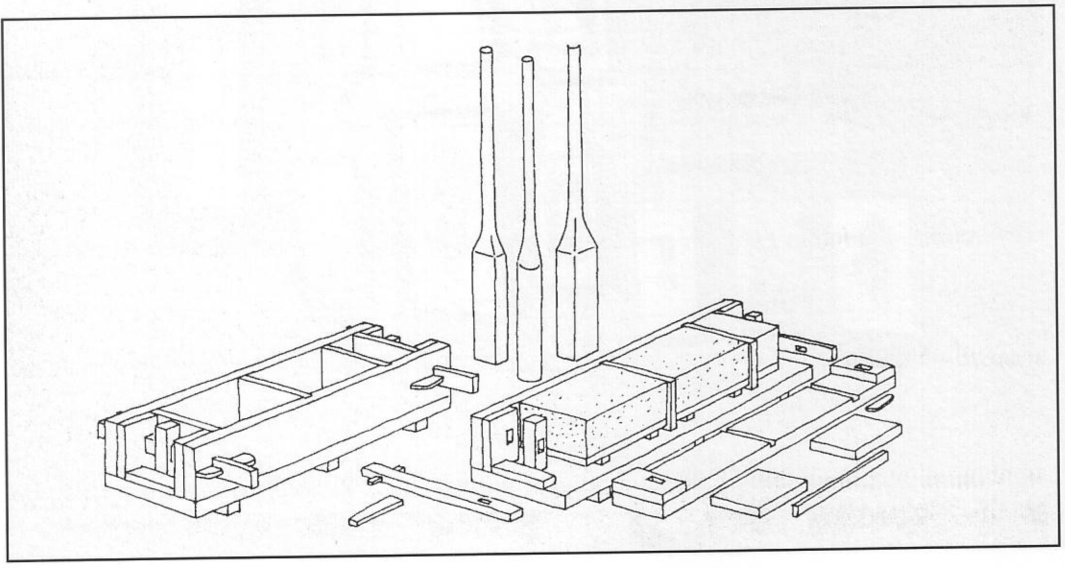
En construcciones con muros monolíticos de barro apisonado e incluso con mampostería de ladrillos de pequeño formato la mano de obra es alta y el tiempo de secado retrasa la construcción debido al agua inherente en el material. Por ello se han buscado nuevas alternativas con elementos prefabricados de mayor escala.

7.2 Adobones

Los adobones son adobes de dimensiones mayores que se colocan con mayor rapidez que los adobes, suponiendo que se puedan manipular con una o dos manos. Agregados para alivianar, así como cavidades pueden utilizarse para disminuir el peso. Es recomendable hacer huecos en los bloques para facilitar la manipulación.

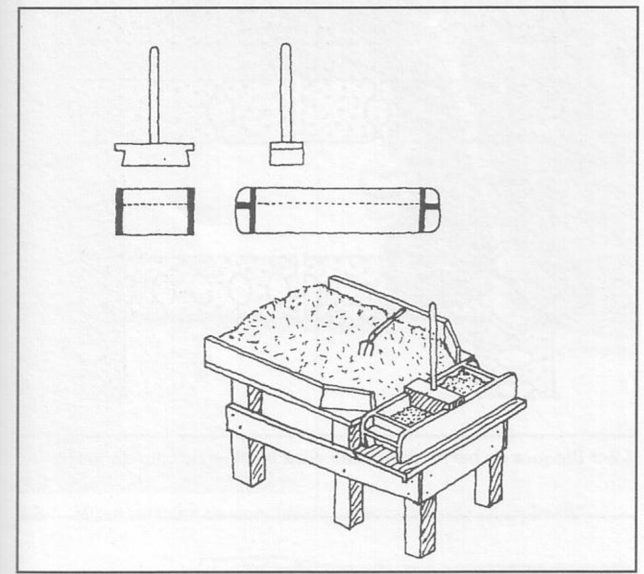


7.2-1
Molde desmontable para grandes bloques de tierra apisonada (según Fauth, 1933)

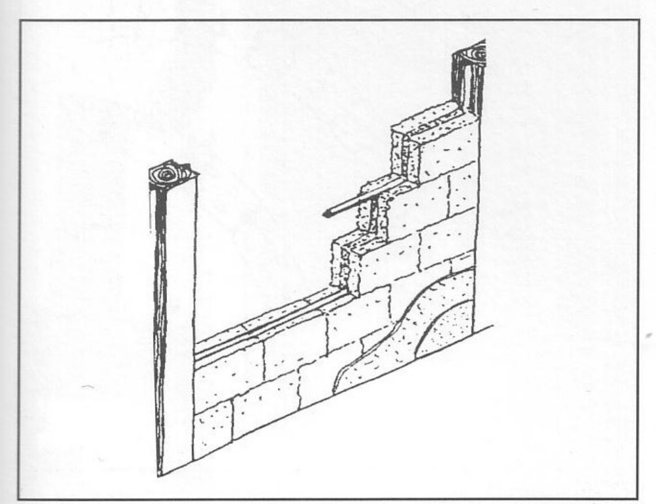


7.2-2
Molde desmontable para grandes bloques de tierra apisonada (según Miller *et al*, 1947)

Dos soluciones desarrolladas en Alemania para producir bloques de tierra apisonada con moldes desmontables se ilustran en la Fig.7.2-1 y 7.2-2. La Fig. 7.2-3 muestra otro sistema para producir bloques grandes con tierra alivianada con paja La Fig. 7.2-4 muestra un muro de bloques de 15x24x30 cm, de barro apisonado alivianado con paja y con un peso de 9,5 kg, los bloques tienen una hendidura que debe ser rellenada con mortero y que puede ser también utilizada para insertar un perfil de madera que mejore la estabilidad lateral del muro.
Los bloques alivianados con paja de 50x60x30 cm, empleados por el arquitecto Alemán Sylvester Dufter en muchos proyectos son más eficientes para la construcción de muros, a pesar que cada bloque pesa 26 kg.

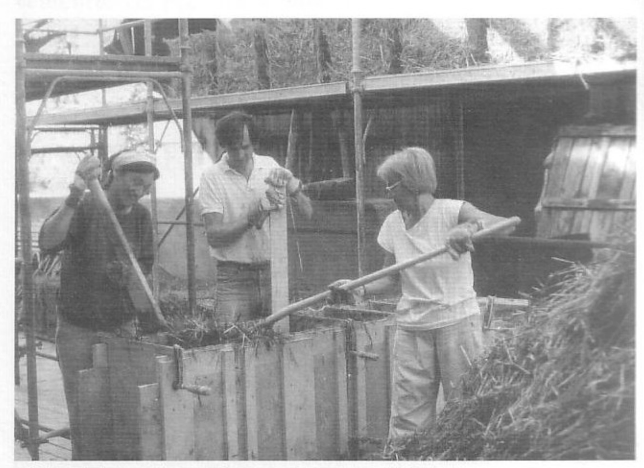


7.2-3 Mesa de trabajo para moldear bloques de tierra apisonada (según Pollack, Richter, 1952)

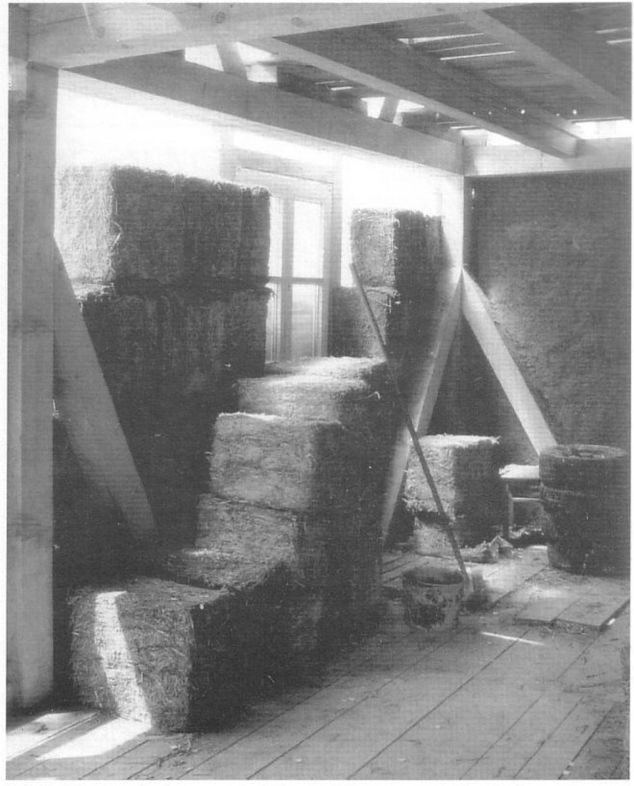


7.2-4 Muro interior construido con bloques de barro alivianado con paja. (según Ökologie in der Region)

Estos se producen bajo techo y pueden elaborarse cerca al muro, de manera que sean después más fácilmente colocados en su posición final (ver Fig. 7.2-5 y 7.2-6). Con este sistema el muro de 50 cm de espesor ofrece un valor U de 0.3 W/m2K. Dufter ha conducido varios proyectos de autoconstrucción utilizando estos bloques. En uno de los casos la familia propietaria elaboró 1500 bloques en cinco semanas, suficientes para toda su casa. En Hungría, se produjeron bloques de barro alivianado con arci-



7.2-5 Elaboración de bloques de barro alivianado con paja



7.2-6 Muro exterior construido con bloques grandes de barro alivianado con paja.

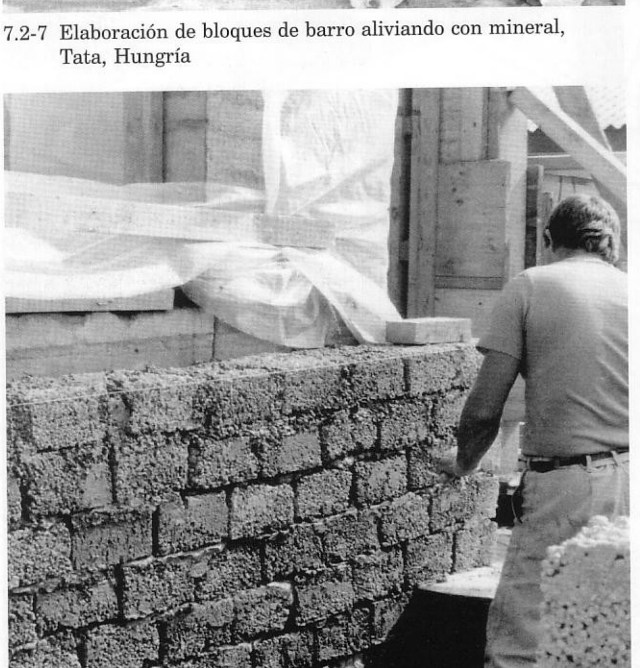
lla expandida de 15x15x30 cm utilizando máquinas del tipo utilizado para hacer bloques de hormigón (Fig. 7.2-7). Estos bloques se utilizaron para proveer de un aislamiento térmico externo adicional a una vivienda con muros de barro apisonado en Tata, Hungría (Fig. 7.2-8). Secciones diferentes para paneles de mayor escala para muros hechos de barro alivianado con mineral desarrollados por el autor se muestran en la Fig. 7.2-9. Estos pueden ser utilizados en muros interiores así como en muros exteriores para incrementar el aislamiento térmico desde el exterior. Las cavidades reducen el peso e incrementan el aislamiento térmico y al mismo tiempo permiten una mejor manipulación. La Fig. 7.2-10 muestra elementos similares que pueden ser utilizados para construir bóvedas.

7.3 Paneles prefabricados para muros

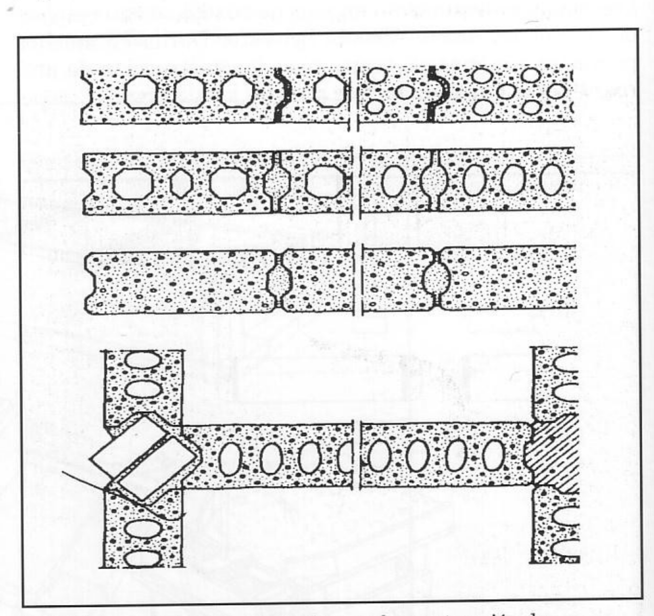
Se han utilizado paneles prefabricados de 6 a 12 cm de espesor de 30x60 cm hasta 62.5x100 cm como elementos



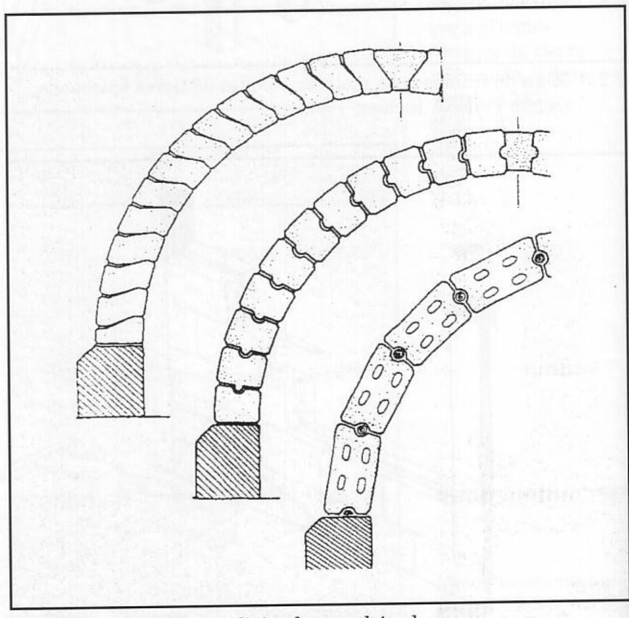
7.2-7 Elaboración de bloques de barro aliviando con mineral, Tata, Hungría



7.2-8 Utilización de bloques de barro aliviando con mineral como aislamiento externo adicional para una muro de barro apisonado, Tata, Hungría



7.2-9 Bloques de barro alivianado para la construcción de muros

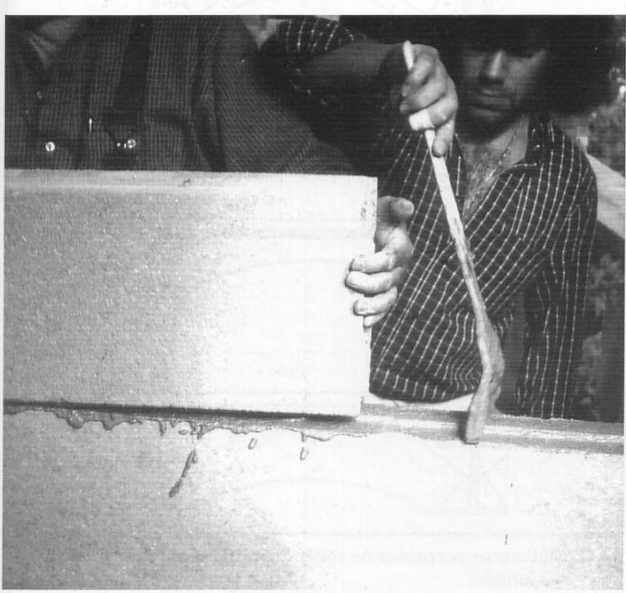


7.2-10Bloques de barro aliviando para bóvedas

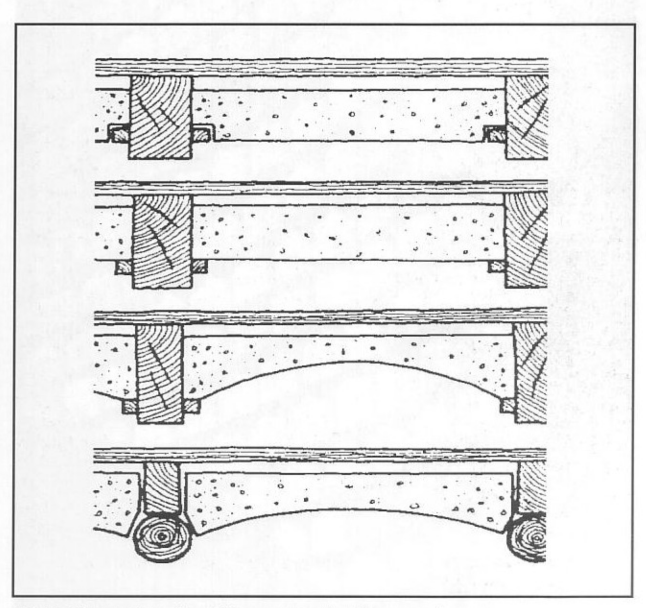
no portantes. Estos deben ser de barro alivianado con una densidad de 800 a 1000 kg/m^3.
Un panel extremadamente ligero con una densidad de 550 kg/m3 fue diseñado por la empresa alemana Breidenbach. Este está hecho de esteras de caña revocadas con barro y cubiertas con tela de yute.
La Fig. 7.3-1 muestra un muro de paneles alivianados "Karphosit" de 62,5x25x10 cm, producidos con arcilla en polvo y paja picada, tienen una densidad de 950 kg/m3. La empresa alemana "Terra limes" desarrollo un panel que consiste en un entramado de madera de 1 m de ancho y hasta 3 m de altura, relleno con barro aliviando que puede ser montado con una grúa, ver Fig. 7.3-2 y 7.3-3.

7.4 Elementos de relleno para losas

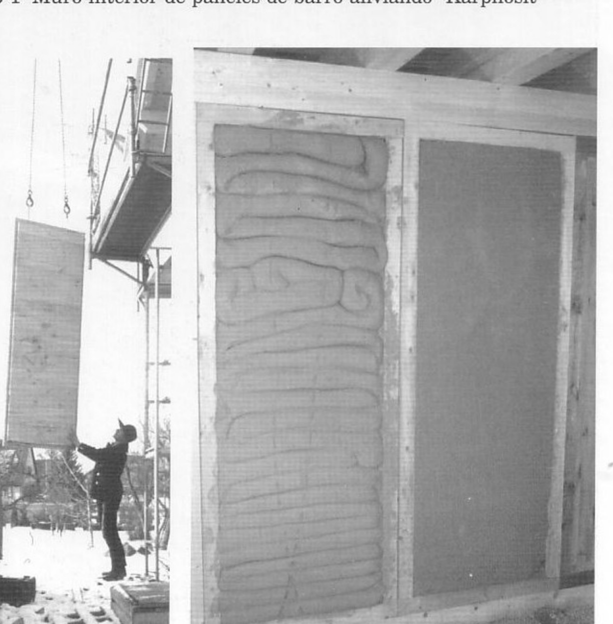
Los elementos de barro que actúan como relleno no portante para losas proveen también aislamiento térmico y aislamiento contra el ruido (Fig. 7.4-1). El autor realizo en Hungría en 1987, elementos portantes de relleno para losas, hechos de barro alivianado estabilizado con cemento. La Fig. 7.4-2 muestra uno de estos elementos



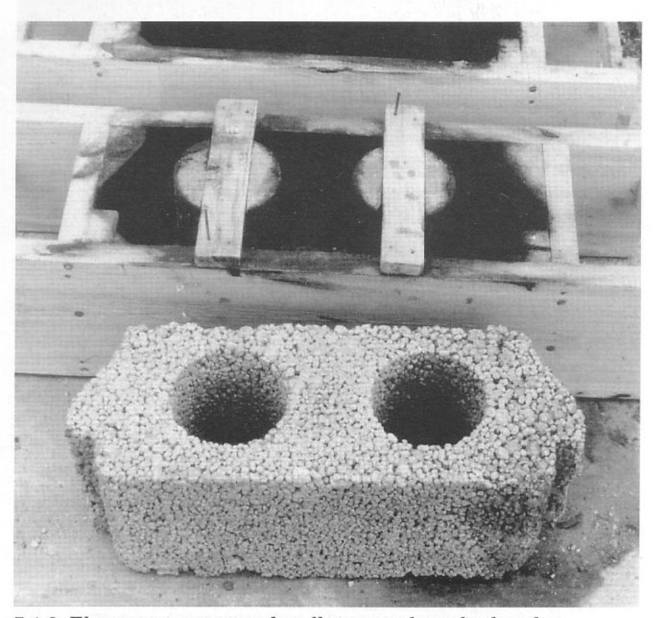
7.3-1 Muro interior de paneles de barro aliviando "Karphosit"



7.4-1 Elementos de relleno no portantes para losas



7.3-2 y 7.3-3 Entramados de madera rellenos de barro

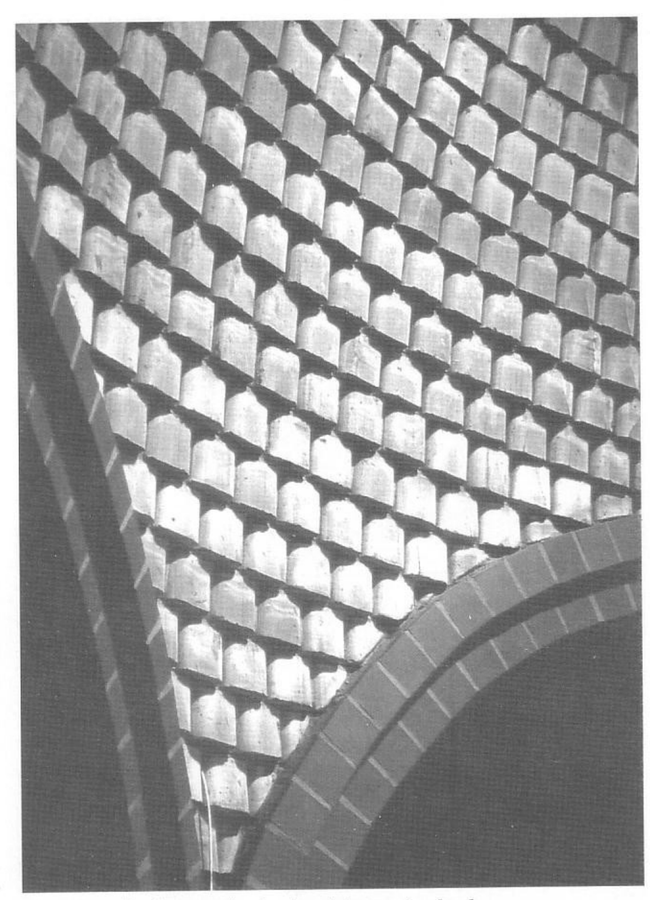


7.4-2 Elementos portantes de relleno para losas hechos de barro alivianado estabilizado con cemento, Hungría

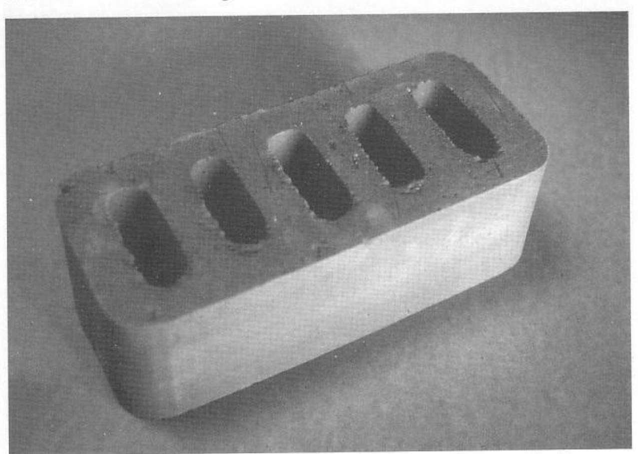
así como el molde. La Fig. 7.4-3 muestra diferentes diseños del autor para elementos portantes de relleno para losas.

7.5 Adobes para optimizar la acústica

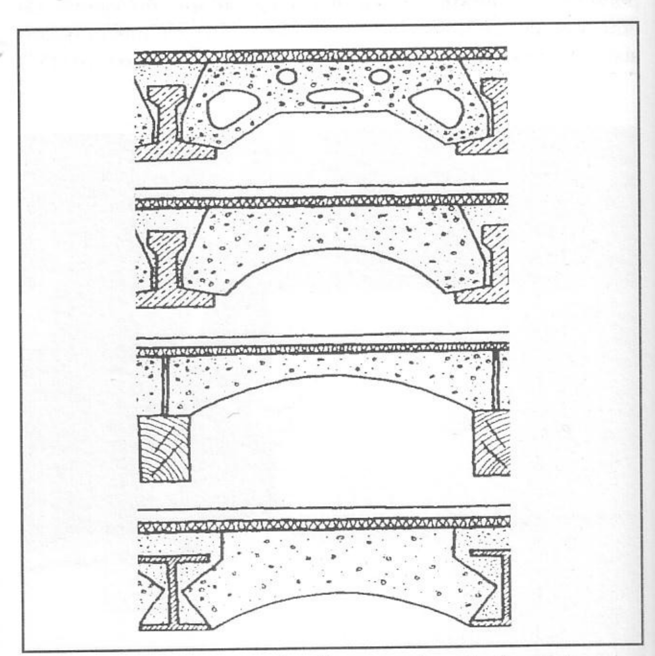
Para optimizar la acústica de las cúpulas, el autor diseñó adobes especiales con huecos y bordes redondeados (Fig. 7.5-2). Debido a esta forma en los bordes y la inclinación de los adobes (Fig. 7.5-1), se obtiene una buena distribución del sonido y se produce también una cierta absorción del sonido por las juntas rehundidas y los huecos en los adobes.
En un instituto en Kassel, Alemania se construyeron 760 m^2 con estos adobes, para no solo optimizar la acústica pero también para optimizar el balance de la humedad, el



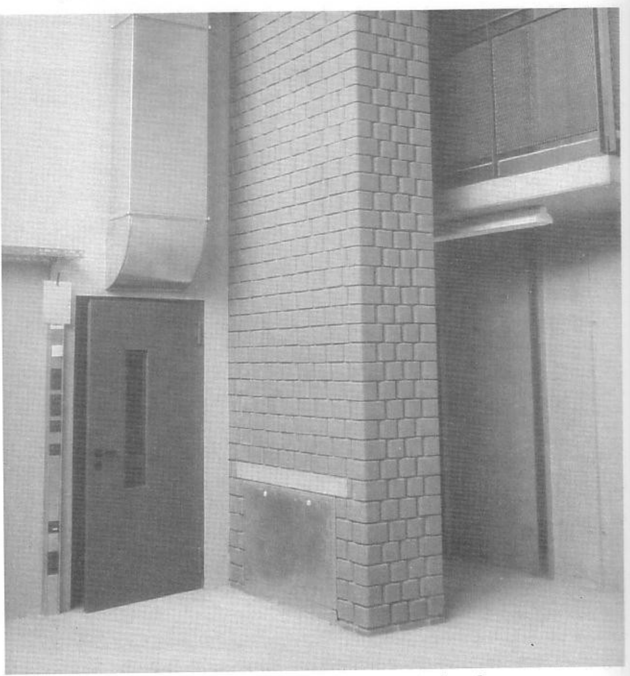
7.5-1 Detalle de una cúpula de adobes redondeados



7.5-2 Adobe especial para optimizar la acústica de una cúpula



7.4-3 Elementos portantes de relleno para losas hechos de barro alivianado.



7.5-3 Adobes especiales para optimizar la acústica de un muro

almacenamiento de calor. Como se puede ver en la Fig. 7.5-3 estos bloques tienen la ventaja que no se necesitan protecciones para las esquinas debido a su bordes redondeados.

7.6 Baldosas para pisos

Para el acabado de pisos se pueden utilizar baldosas prefabricadas de barro. Tienen la ventaja de que puesto que ya están secas, la retracción solo ocurre en las juntas. Miller, et al (1947, p. 5) recomienda utilizar Fe_3O_4, sangre de toro y alquitrán para estabilizar y proveer una buena resistencia en la superficie de estas baldosas.

Pruebas efectuadas en el Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB), de la Universidad de Kassel, Alemania, demostraron que se puede alcanzar un alto grado de resistencia de la superficie de las baldosas, añadiendo 6% de aceite de linaza doblemente cocido en la mezcla, combinado con una compactación de la superficie y aplicando después cera de piso.

Métodos para incrementar la resistencia de la superficie se describen en la sección 14.4.3.

8. Modelado directo con barro plástico

8.1 Generalidades

El barro como ningún otro material de construcción tiene la característica de convertirse en un material plástico al mezclarse con agua, pudiendo así ser moldeado. Representa por ello un reto de creatividad para los diseñadores y constructores. El modelado manual de muros con bolas de barro plástico o pastas plásticas de barro, es una técnica tradicional muy extendida en África y Asia y también conocida en Europa y América. Es la técnica más simple y primitiva ya que ninguna herramienta es requerida.
En esta técnica, la mezcla preparada se utiliza directamente (sin moldes ni procesos intermedios). La desventaja de ésta sin embargo, es que incluso las mezclas rebajadas con solo 10 a 15% de arcilla muestran una retracción lineal de 3% a 6% al secar. Mientras más elevado sea el contenido de arci-



8.1-1
Modelado de un banco con barro húmedo

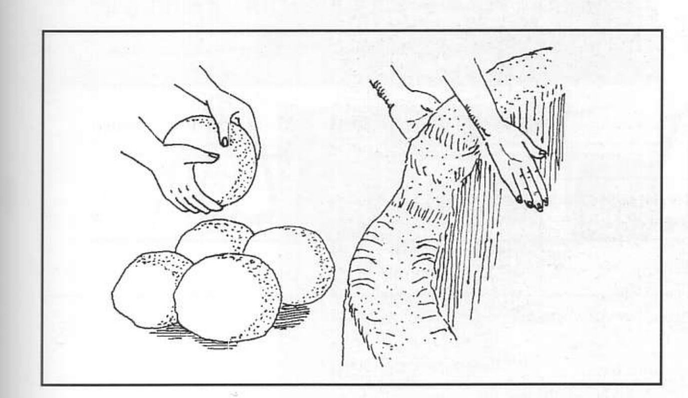


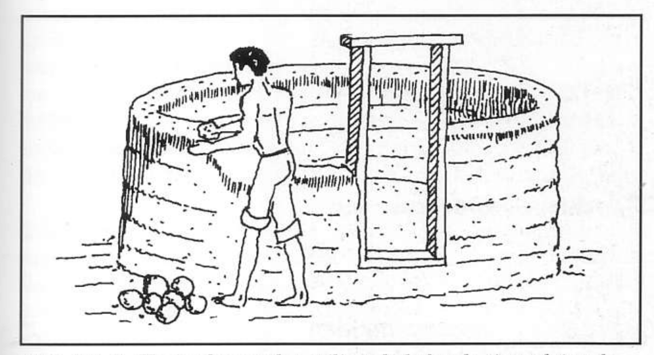
8.1-2
Grietas de retracción en el banco después del secado

lla y agua en la mezcla, mayor será la retracción. Las pastas de barro con un alto contenido de arcilla pueden llegar a tener una retracción lineal de hasta 10 %.
Las Fig. 8.1-1 y Fig. 8.1-2 muestran un banco modelado con elementos de barro donde la retracción no se tomó en cuenta. Las secciones siguientes explican como las juntas prediseñadas, los elementos de menores dimensiones y la utilización de elementos curvos pueden reducir e incluso evitar las fisuras de retracción. La teoría de la reducción de las fisuras mediante un cambio en la composición de la mezcla se expone en la sección 4.2.

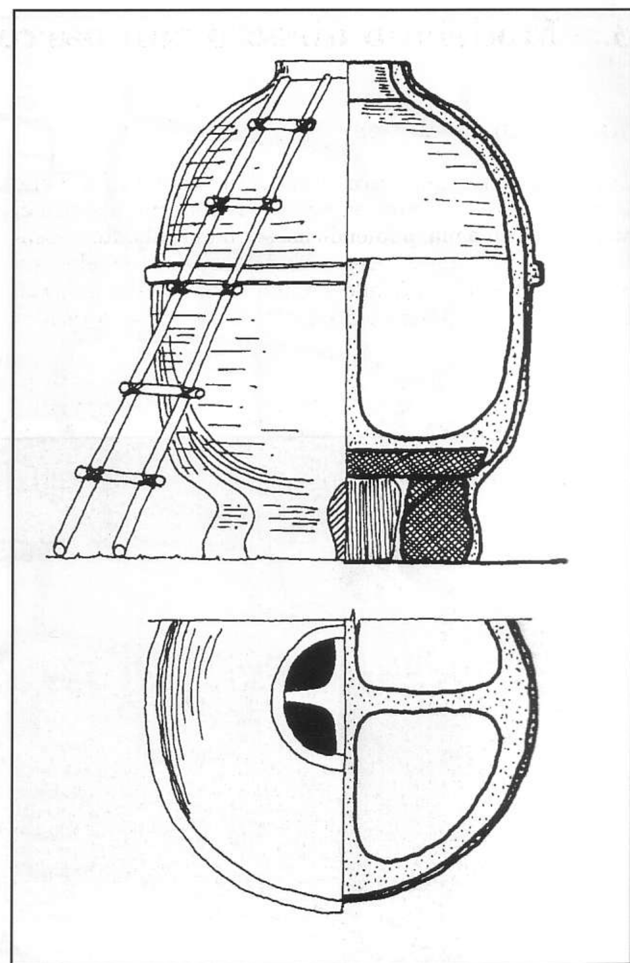
8.2 Técnicas tradicionales con barro húmedo

Mientras que en la construcción con adobes, éstos se colocan con mortero, en las técnicas húmedas se emplea para la construcción de muros, barro plástico sin mortero, uniéndolo mecánicamente a través del compactado, pegado, apretado o lanzado.
En el sur de la India se emplea aún hoy en día una técnica de barro plástico muy simple: utilizando un azadón se mezcla el barro con el agua hasta obtener una pasta, que se transporta sobre la cabeza en contenedores y se vierte sobre el muro en construcción. El barro se distribuye manualmente en capas de 2 a 4 cm de espesor. La pasta expuesta al sol seca rápidamente y el muro se puede construir continuamente capa por capa.

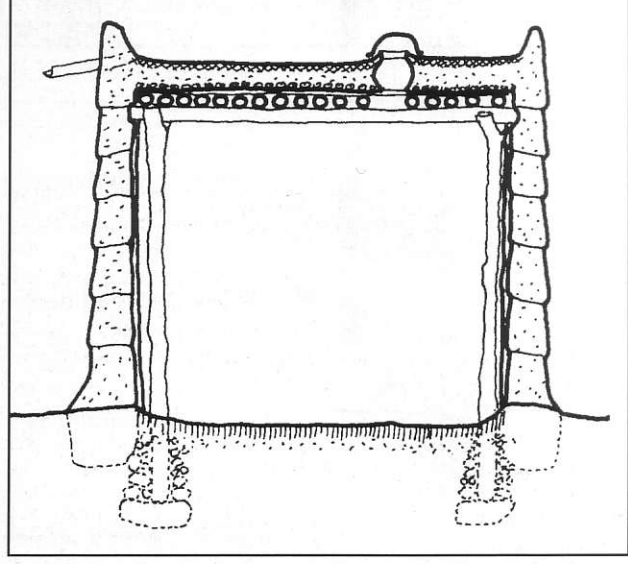




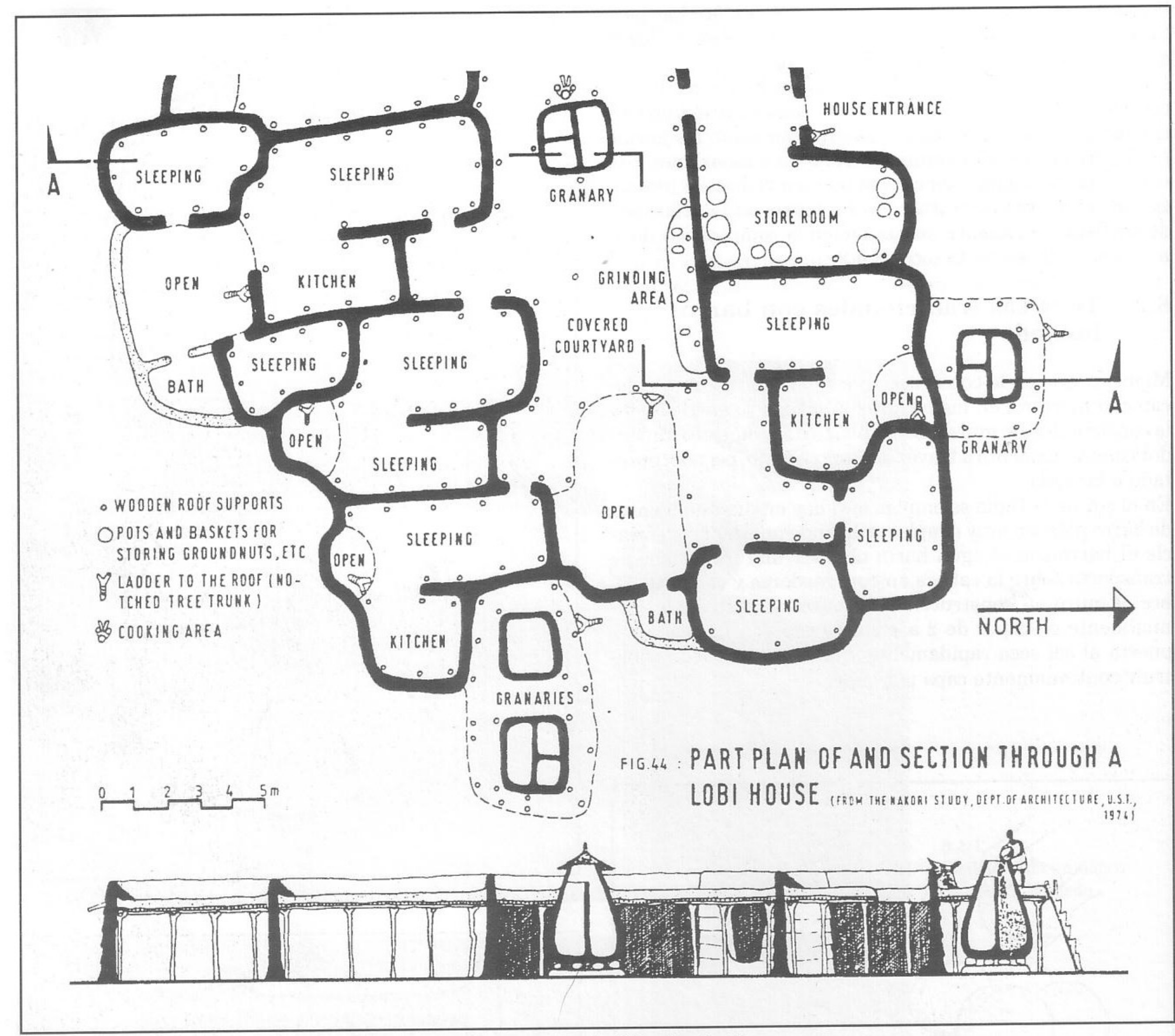
8.2-1, 8.2-2 Haciendo paredes utilizando bolas de tierra húmeda, nordeste de Ghana (según Schreckenbach)



8.2-3 Granero, Ghana (según Schreckenbach)



8.2-4 Vivienda típica, noroeste de Ghana (según Schreckenbach)



8.2-5 Vivienda tradicional de barro húmedo, noroeste de Ghana (según Schreckenbach)

En el nordeste de Ghana, se emplea otra técnica en la que se moldean bolas de tierra húmeda y se utilizan luego para construir muros circulares amontonando y apisonando luego el barro. (Fig. 8.2-1 y Fig. 8.2-2). Después de que el muro seca, la superficie se revoca por ambas caras, se uniforma y pule con una piedra plana mediante movimientos rotatorios. La Fig. 8.2-3 muestra un granero construido de barro, estiércol de vaca y paja utilizando la misma técnica.

En el noroeste de Ghana se construyen muros de 40 cm de espesor con otra técnica tradicional de bolas de barro plástico colocadas en capas de tal manera que cada hilada traslape la anterior (Fig. 8.2-4). Las plantas de estas viviendas son más o menos rectangulares con esquinas redondeadas (Fig. 8.2-5).

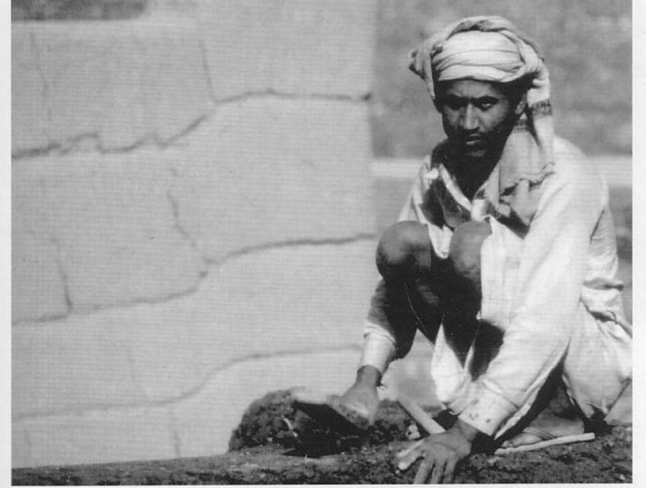
En el norte de Yemen, se construyeron edificios de varios pisos utilizando una técnica de barro húmeda denominada *zabur* (Fig. 8.2-6 a 8.2-8). En esta se forman manualmente bolas de barro con paja y se lanzan con fuerza, para así construir el muro de tal manera que se compacte y adhiera a la base formando una masa homogénea. La superficie es generalmente compactada y uniformada golpeando con un paleta de madera.

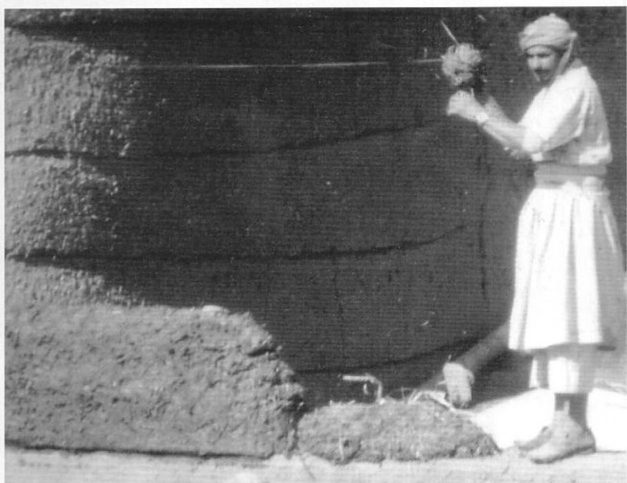
Una técnica de construcción denominada *cob* que utiliza bolas de barro se extendió mucho en el siglo XV y hasta finales de siglo XIX en el sudoeste de Inglaterra, especialmente en Devon, ver Fig. 8.2-9. Hill describe esta técnica de la siguiente manera: Un hombre se coloca con un tridente sobre el zócalo del muro mientras un segundo forma bolas del tamaño de dos puños. Este las lanza al primero



8.2-6 Vivienda de varios pisos hecha usando la técnica *zabur*, Yemen

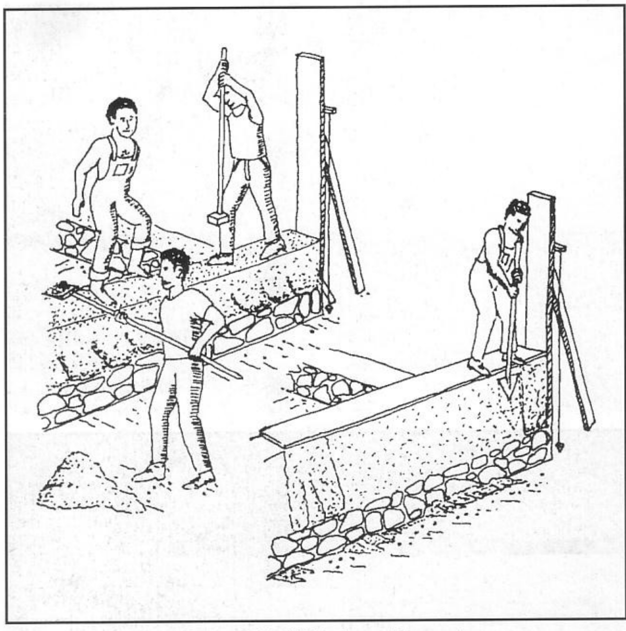
8.2-7 y 8.2-8 Construcción de un muro de barro utilizando la técnica *zabur*



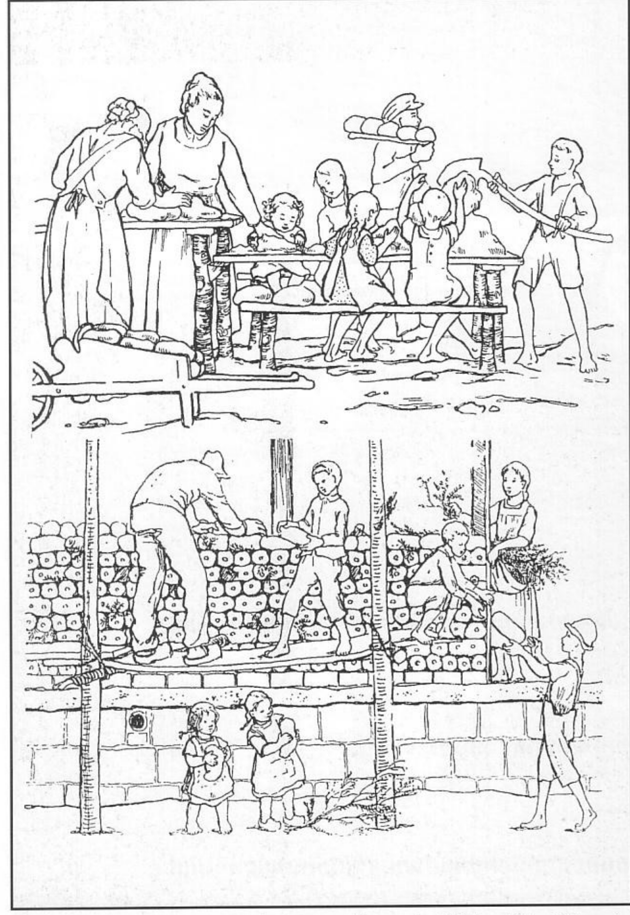




8.2-9
Vivienda de 1410 en Cockington, Devon, Inglaterra



8.2-10 Técnica tradicional de *Wellerbau*, Alemania



8.3-1 Técnica de los panes de barro, Alemania (Heimstätte Dünne)

que las captura con el tridente y retrocediendo las va lanzando sobre el muro. Este compacta el muro con sus pies. De esta manera se construyen hiladas de 50 a 60 cm de altura.
La superficie se alisa como se ve en la Fig. 8.2-10. El espesor del muro es de 45 a 60 cm (McCann 1983). Una técnica similar denominada *Wellerbau* es conocida en Alemania desde la Edad Media, y se difundió especialmente en Thüringen y Sachsen. En esta técnica el barro con paja no se moldea en forma de terrones como en la técnica del *cob*, ni se compacta mediante el lanzando como en la técnica *zabur* sino que se lanza con un azadón y luego se compacta con los pies o con pisón (Fig. 8.2-10). El muro se construye en capas de 80 a 90 cm. Luego de un corto período de secado, la superficie de estas hiladas se uniforma con una espátula.

8.3 Panes de barro

Técnicas similares a las utilizadas en Eslovaquia y Yemen, existieron en el Norte de Africa y Gustav von Bodelschwingh, un misionero alemán adaptó esta técnica a las condiciones alemanas.
Con esta técnica, los panes húmedos de barro se colocan en patrones de masonería pero sin mortero. Un hueco cónico se hace con los dedos en las caras exteriores de cada pan con el objetivo de mejorar la adherencia del mortero del revoque que se aplica posteriormente (ver Fig. 8.3-1 a 8.3-3). Se colocan de tres a cinco hiladas por día. Después que seca el muro se aplican varias capas de revoque de cal. La primera vivienda se construyó en 1925 (Fig. 8.3-3). En los siguientes años cooperativas conformadas por desempleados a iniciativa de Bodelschwingh, construyeron más de 300 viviendas. Todos los miembros de las familias participaban en la producción y construcción como se observa en la Fig. 8.3-1.

8.4 Técnica del *Stranglehm*

8.4.1 Generalidades

En el Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) de la Universidad de Kassel, Alemania, se desarrollo en 1982 una nueva técnica de barro plástico denominada *Stranglehm*. Con ella se pueden construir muros, bóvedas y cúpulas. Incluso se pueden construir muebles y artefactos sanitarios in situ como se describe en la sección 14.10.

8.4.2 Elaboración de los elementos de *Stranglehm*

Con el objetivo de producir perfiles de barro plástico se desarrolló un extrusor en el FEB. Utilizando esta máquina se pueden producir perfiles de barro plástico de 8x16 cm de sección a una velocidad de 3 m por minuto (2 m^3/h), ver Figs. 8.4-1 y 8.4-2.
El equipo consiste en una sección de alimentación con dos cilindros que giran a la inversa mezclando y pasando el material a otra sección que contiene cuchillas rotatorias para mover y empujar hacia adelante el material. El material pasa por un tornillo sin fin que ejerce suficiente pre-

8.3-2 Muro de panes de barro sin revoque, Dünne, Alemania

8.3-3 Vivienda Dünne, Alemania

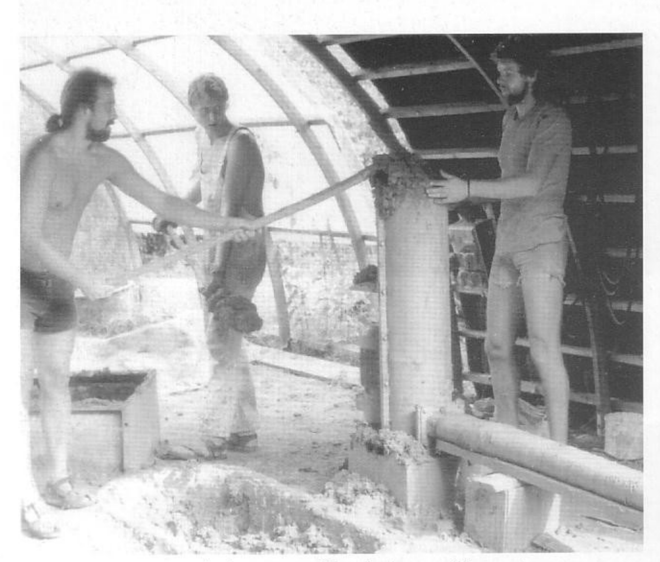
sión para forzar el material hacia afuera por la boquilla del extrusor.

8.4.3 Preparación de la mezcla

Ensayos realizados con más de 30 muestras donde algunas contenían paja, aserrín y hojas de pino, demostraron que la reducción de la retracción y el incremento del rendimiento eran insignificantes.
Esto demostró que la fuerza de trabajo adicional y esfuerzos requeridos para añadir esos aditivos no valían la pena. Sin embargo la adición de suero incrementa el rendimiento ligeramente ofreciendo una mejor resistencia al agua y dureza a la superficie. El polvo de caseina y agua puede sustituir al suero. La mezcla para esta técnica debe tener mayor contenido de arcilla que para los bloques de tierra compactada. Un contenido de arcilla del 15% es ventajoso. Una mezcla con bajo contenido de arcilla mostró fisuras en los bordes de los elementos. El contenido se debe optimizar de tal manera que el perfil terminado este lo suficientemente seco para manipularlo y suficientemente húmedo para adherirse con los otros durante su colocación en el muro.

8.4.4 Colocación de elementos

En la primera casa de ensayo construida en la Universidad de Kassel, Alemania en 1982 (Fig. 8.4-3 y 8.4-4), se transportaron perfiles de 2 m de largo sobre una tabla y se voltearon sobre el muro. El acabado de las juntas se hizo con la mano o con un palito modelador. Debido a que es necesario que las capas superiores no aplasten la inferiores solo

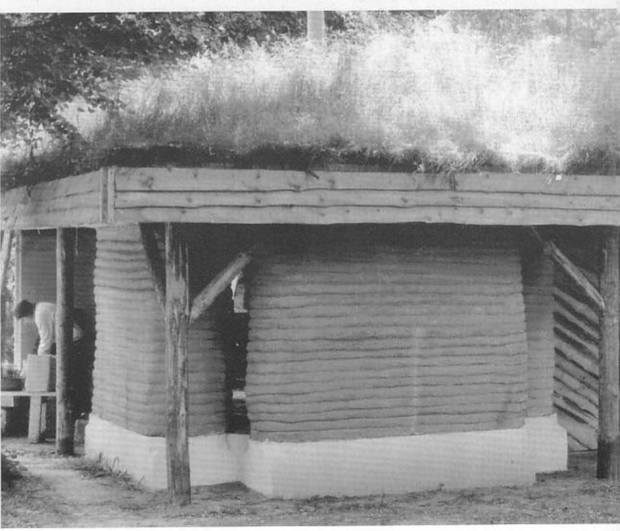


8.4-1 Extrusor vertical para perfiles de barro (Heuser)



8.4-2 Extrusor horizontal optimizado (Heuser)



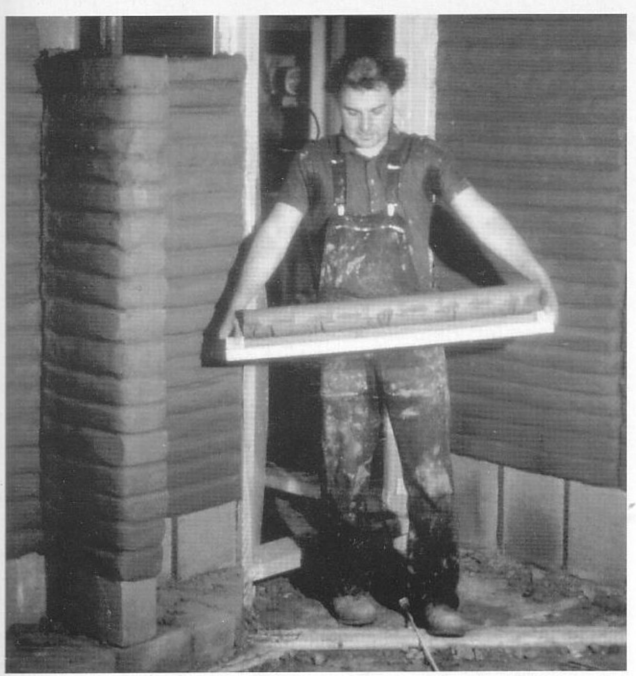


8.4-3, 8.4-4 Muros de perfiles de barro extruidos, casa de ensayo, Universidad de Kassel, 1982

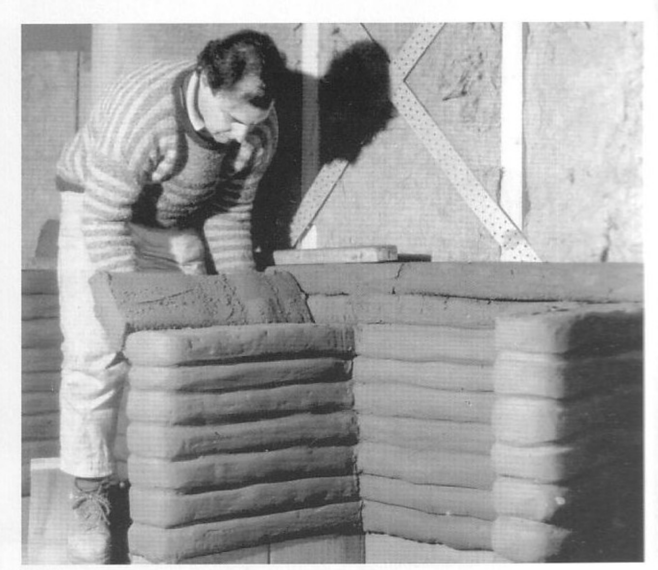
se deben ejecutar de 4 a 5 capas por día. Ya que los perfiles tienen una retracción de aproximadamente 3% fue necesario rellenar las fisuras de retracción que aparecieron.
Al ser este trabajo muy laborioso, se decidió en la próxima vivienda que se construyó en Kassel, Alemania, en 1984, utilizar perfiles de solo 70 cm de largo, ya que los resultados demostraron que con esta longitud y con juntas de retracción prediseñadas cada 70 cm, no aparecen fisuras en los elementos.
El extrusor se colocó en el centro de la vivienda para minimizar la distancia de transporte.
Las Figs. 8.4-5 hasta 8.4-8 muestran la elaboración, transporte y colocación de estos elementos. Los muros de este proyecto tienen una estructura de madera con columnas a una distancia de 2.1 m.
El panel que se forma se divide en tres partes con elementos de madera verticales de 4x4 cm (Fig. 10.8-7). Estos actúan como machihembre, fijándose a los elementos de barro para proveer estabilidad lateral. Para garantizar la separación de los elementos en sus extremos de manera tal que esta junta actúe como una junta prediseñada de contracción, se hizo un corte con un badilejo. Luego del secado estos huecos se expanden debido a la retracción pudiendo ser rellenados al secarse con una mezcla de cal, yeso, arena y barro. Es muy fácil alisar la superficie de estos elementos con una esponja húmeda (Fig. 8.4-9).



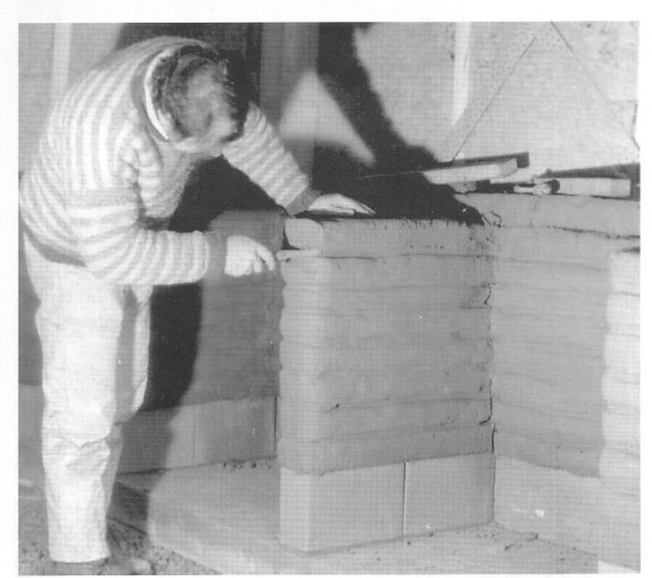
8.4-5 Extrusión de perfiles de barro



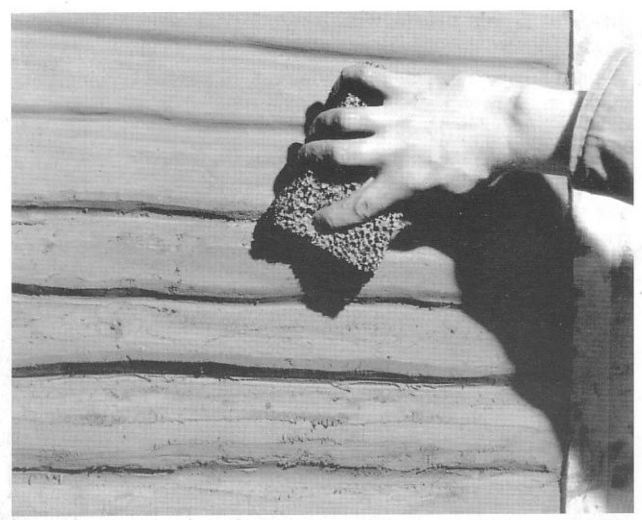
8.4-6 a 8.4-8 Colocación de perfiles de barro extruidos en estado plástico



8.4-7



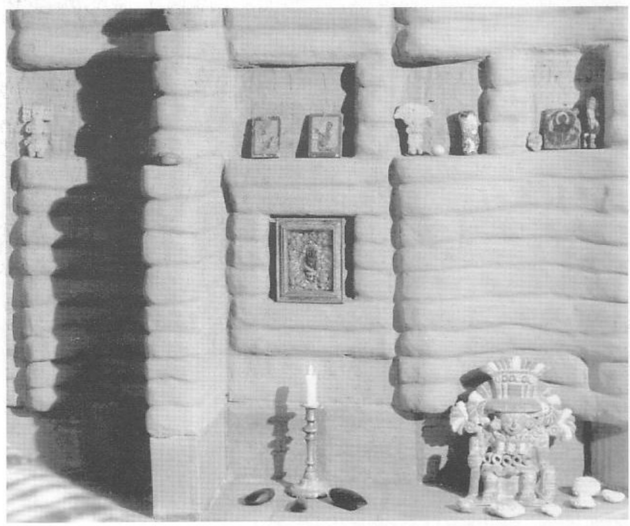
8.4-8



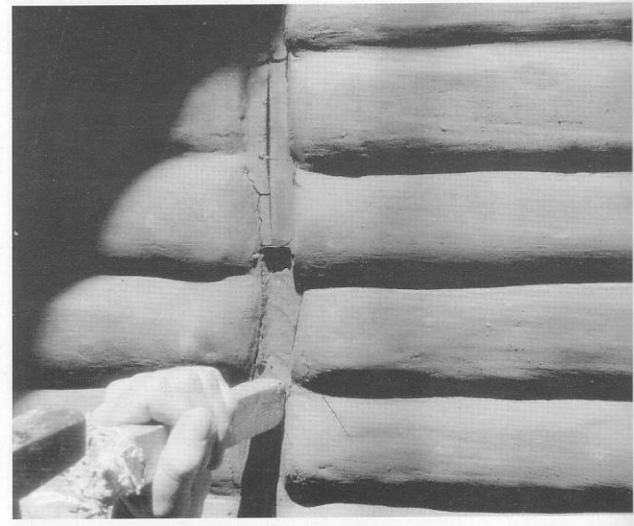
8.4-9 Alisado de la superficie con una esponja húmeda



8.4-12 Muro de *stranglehm* sin alisar y pintado con una lechada de cal y barro



8.4-10 Muro interior esculpido hecho de perfiles extruidos de barro



8.4-13 Rellenado de una junta de retracción



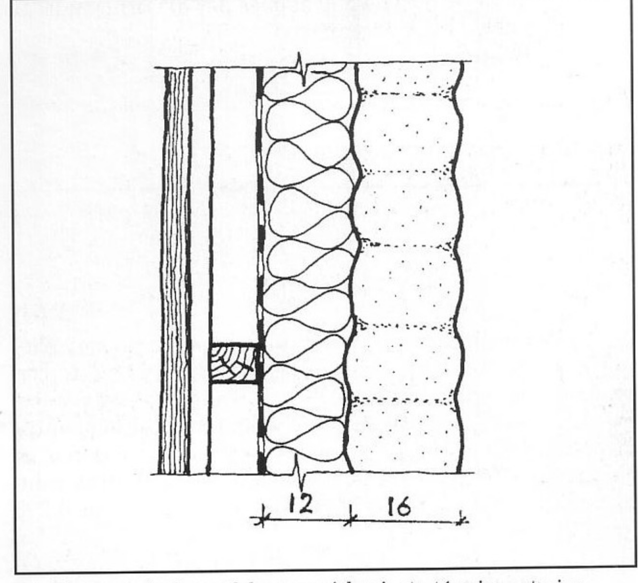
8.4-11 Revoque esculpido exterior hecho de perfiles extruidos de barro

8.4-14Muro interior hecho con perfiles de barro extruido

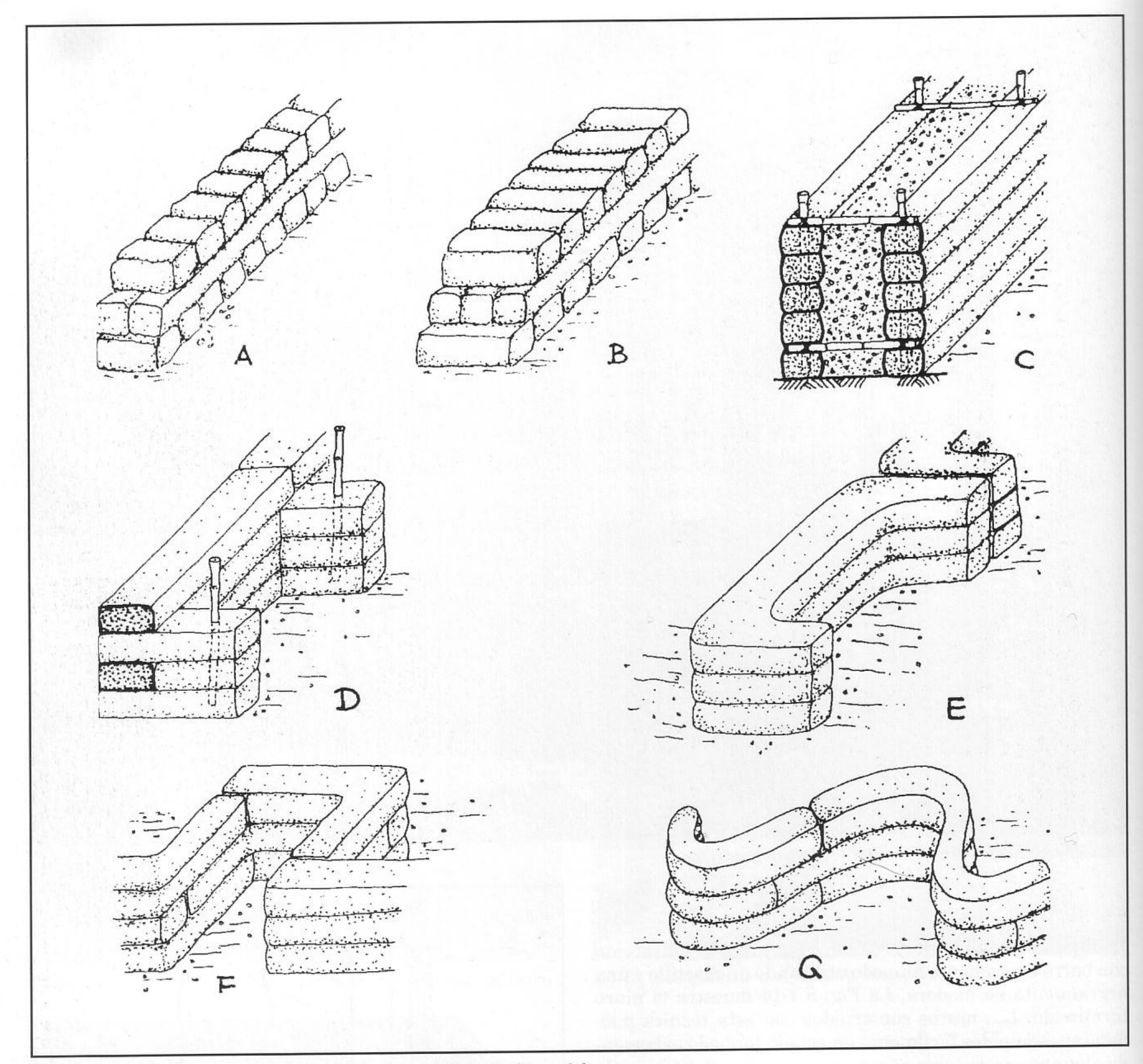
La Fig. 8.4-13 muestra el relleno de la junta de retracción con barro ligeramente húmedo utilizando un martillo y una herramienta de madera. La Fig. 8.4-14 muestra el muro terminado. Los muros construidos con esta técnica pueden ser esculpidos fácilmente en estado húmedo extrayendo algunas partes como se muestra en la Fig. 8.4-10 y en la Fig. 8.4-11 donde se adiciona o extrae material para esculpir el muro. Dependiendo del gusto estético, es más fácil pintar la superficie con una lechada espesa por ejemplo de barro, cal y quark descremado en proporciones 1:1:1 (Fig. 8.4-12).
El autor ya no utiliza esta técnica y en su lugar desarrolló una técnica nueva que se describe en la sección 10.8.

8.4.5 Tipos de muros

No se recomiendan los elementos largos debido a la retracción de 3 a 5%. La Fig. 8.4-16 muestra diferente posibilidades para muros interiores y exteriores utilizando elementos cortos. La solución C en esta figura es solo para muros exteriores.



8.4-15 Muro de *Stranglehm* con aislamiento térmico exterior adicional



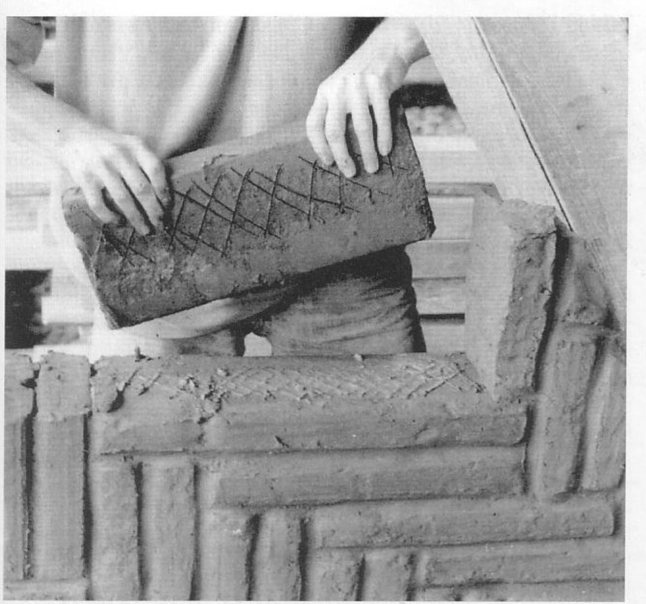
8.4-16 Variantes de muros exteriores e interiores utilizando *Stranglehm*

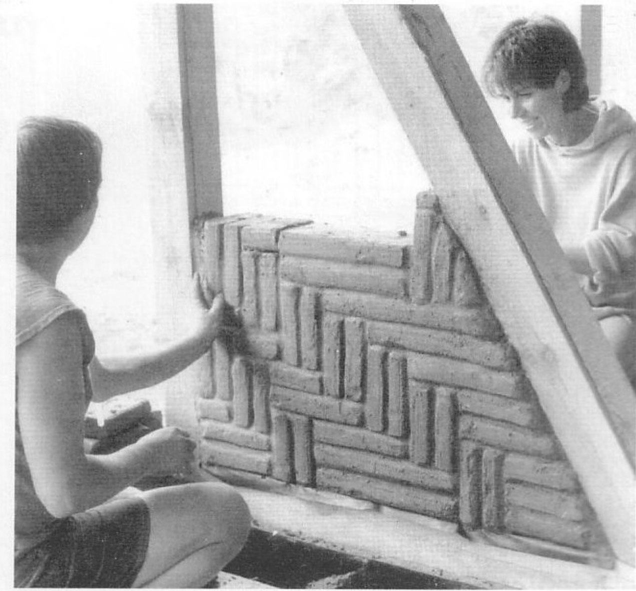
Para incrementar el aislamiento térmico se puede rellenar el espacio entre las dos muros de barro extruido con material alivianado como corcho, arcilla expandida, pómez, etc. En este espacio también se pueden colocar elementos estructurales. Si los otros muros ilustrados requieren de aislamiento térmico, en la Fig. 8.4-15 se ofrece una solución común donde el valor U del muro ilustrado es de 0.295 W/m²K.

Las Figs. 8.4-17 a 8.4-19 muestran el trabajo realizado para una vivienda en Kassel donde se emplearon perfiles extruidos más pequeños producidos en una ladrillera. Por el proceso de producción, estos deben tener un mayor contenido de arcilla causando problemas de retracción y debiéndose reparar las fisuras que aparecen en los elementos.

8.4.6 Cúpulas

En 1984 se desarrollo en el FEB una técnica de cúpulas utilizando elementos de barro extruido. Los muros de la cúpula se construyeron colocando elementos de 40 cm de longitud alternando la dirección de las diagonales en cada

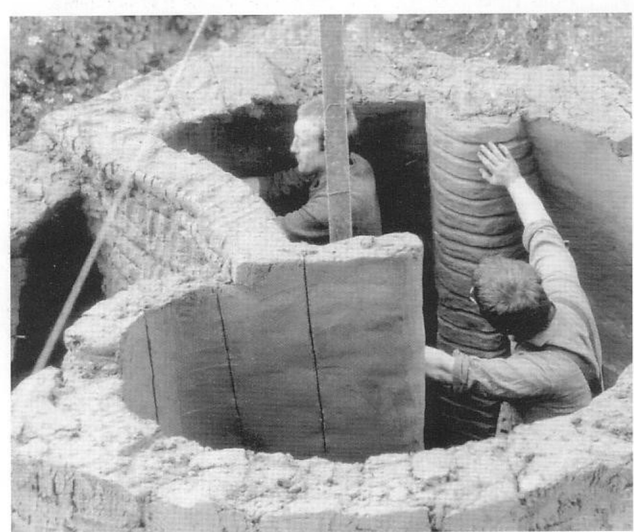


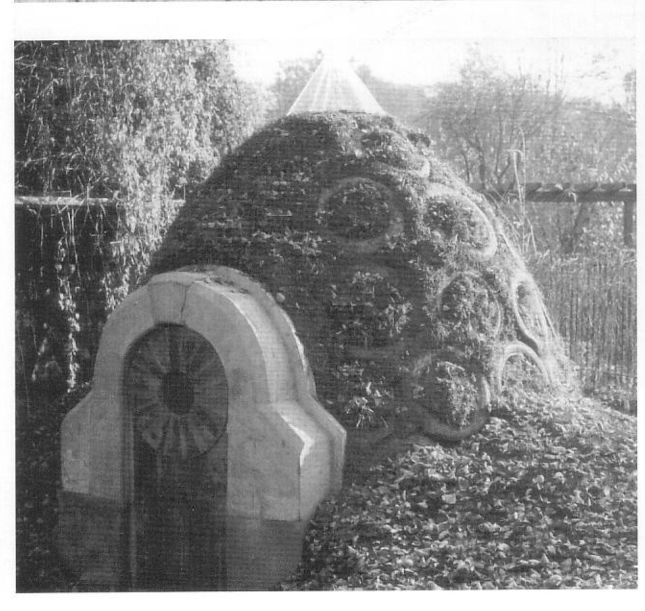


8.4-17 a 8.4-19 Elaboración de muros de *Stranglehm* con diferentes diseños

8.4-20 Muros de *Stranglehm,* vivienda en Uchte, Alemania (1986)







hilada (Figs. 8.4-20 a 8.4-22). Los elementos se fijan con un mazo para obtener un muro más homogéneo y una mejor cohesión. El acabado de la cúpula se hizo con un recubrimiento de una lámina de poliester cubierta de PVC que ofrece una capa impermeable y permite colocar tierra y césped encima sin peligro de que las raíces penetren. Se emplearon llantas usadas de autos para evitar el deslizamiento del césped. Otras posibilidades para cubrir cúpulas de tierra se describen en la sección 14.7.

8.4-20 y 8.4-21 Construcción de una cúpula de *stranglehm*

8.4-22 Cúpula experimental recubierta con césped, Universidad de Kassel, 1984

9. Entramados rellenos con barro plástico

9.1 Generalidades

El barro plástico ha sido utilizado por miles de años para rellenar espacios en viviendas construidas con rollizos, donde los maderos se colocan horizontalmente y en empalizadas (donde los rollizos se colocan verticalmente). En las viviendas de entramado tradicional en Europa *(Fachwerk)* así como en las técnicas Americanas, Africanas y Asiáticas de bahareque, el barro plástico (generalmente mezclado con paja picada) se lanza en una estera de ramas, gajos, caña de bambú y otros (Fig. 9.1-1). Existen muchas variantes de esta técnica como se muestra en este capítulo.

En las secciones 9.3, 9,6 y 9.7 se describen técnicas modernas de relleno con equipos mecánicos que reducen el tiempo de ejecución.

9.2 Bahareque (Quincha)

Las técnicas de barro lanzado han sido utilizadas en todos los climas tropicales, sub-tropicales y templados del mundo y son probablemente más antiguas que las técnicas del tapial y los bloques de tierra. Estas técnicas se denominan en español *bahareque, bajareque, bareque o quincha*, en inglés *wattle-and-daub* y *Lehmbewurf* en alemán.

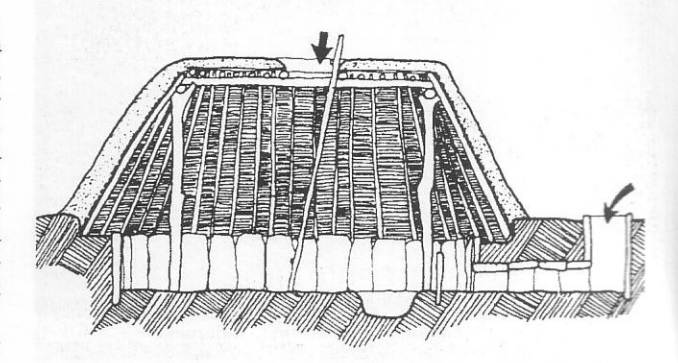
La estructura consiste en elementos verticales y horizontales que forman una malla. Los sistemas europeos emplean usualmente elementos verticales de madera combinados con ramas delgadas. (Fig. 9.2-3).

El barro se mezcla con paja picada o a veces con fibras, se lanza o se compacta sobre la malla de tal manera que todos los elementos estén cubiertos con al menos 2 cm de la mezcla. Si este recubrimiento no tiene un espesor suficiente y si las fisuras no se reparan debidamente la pared se deteriora rápidamente (Fig. 9.2-2). La consistencia del mortero a utilizar se comprueba fácilmente dejando caer una bola de 10 cm de diámetro desde una altura de 1 m sobre una superficie dura. Si el diámetro del disco aplastado que se forma es de 13 a 14 cm la consistencia es la apropiada.

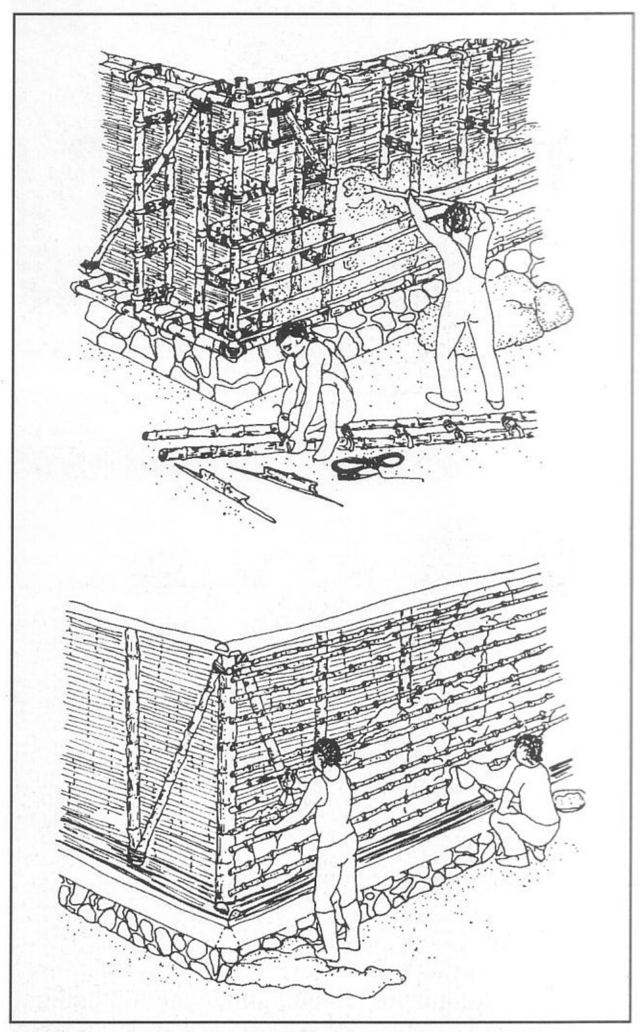
Las Figs. 9.2-1 y 9.2-4 muestran una modificación en la técnica del bahareque en la que la dimensión de la malla es superior (hasta 20 cm) y existe una malla interior y una exterior. El espacio intermedio que se forma se rellena con bolas de barro. Algunas veces se emplea grava gruesa o piedras para rellenar. El muro que se muestra en la Fig. 9.2-4 está construido con elementos prefabricados y fue utilizado en muchos proyectos de bajo costo en Bahía, Brasil.

9.3 Barro proyectado

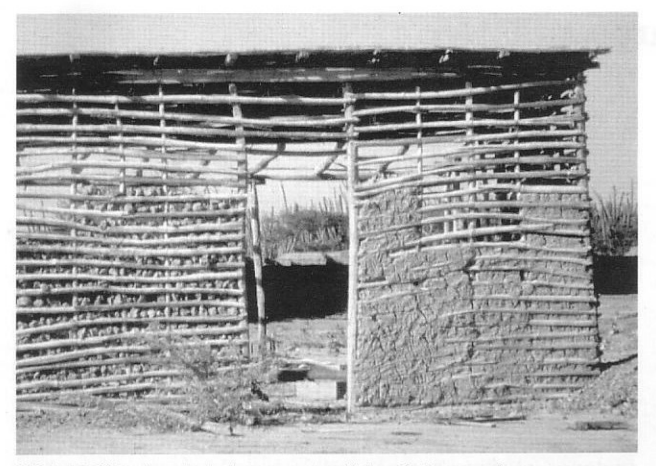
Ya que la técnica del bahareque requiere de mucha mano de obra se ha experimentado la utilización de máquinas proyectoras para rociar la mezcla. El problema principal con todas estas técnicas es la aparición de fisuras de retracción.



9.1-1 Construcción tradicional *"pit house"* de los indios Pueblo, siglo III a.C. (Bardou, Arzoumanian, 1978)



9.2-1 Variantes de la técnica del bahareque (según Vorhauer, 1979)



9.2-2 Edificación de bahareque tradicional, Venezuela



9.2-3 Bahareque tradicional alemán *"Lehmbewurf"*, museo Kommern, Alemania

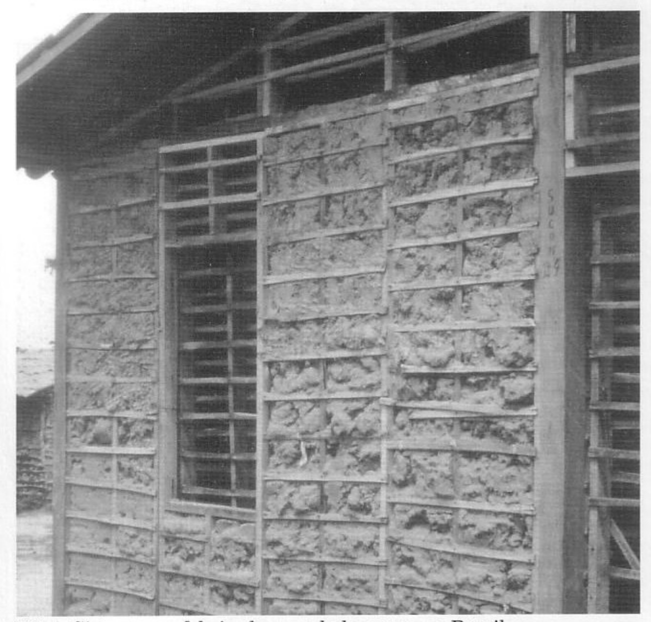
El arquitecto alemán Hans-Bernd Kraus desarrolló una técnica en la cual una mezcla de barro rebajado se proyecta simultáneamente con aserrín seco (desde una boquilla separada). Ambos materiales se mezclan antes de alcanzar la pared. Capas de 4 a 6 cm de espesor se proyectan sobre paneles de fibra de madera utilizados como encofrado perdido, estos son además un buen aislamiento térmico (Fig. 9.3-1) Otro barro alivianado que es posible proyectar, empleado para incrementar el aislamiento térmico de muros se describe en la sección 11.5.

9.4 Estacas enrolladas y botellas de barro

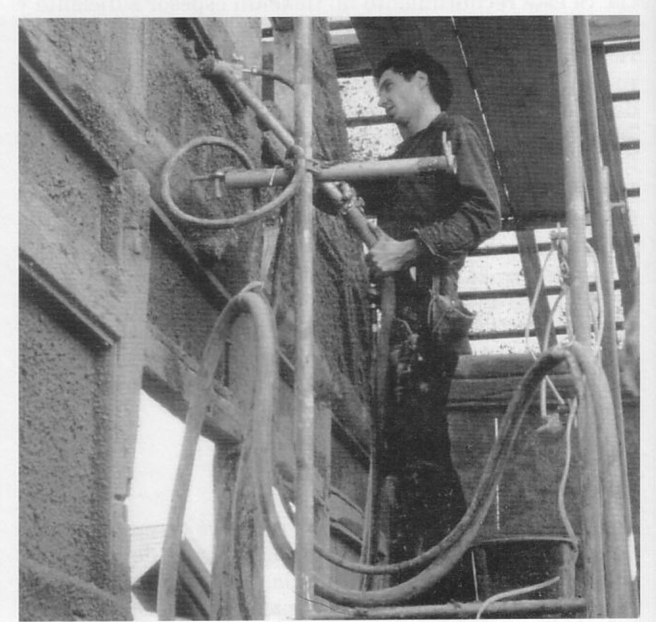
En Alemania y Francia los espacios en los entramados de las viviendas tradicionales se rellenan algunas veces mediante una técnica denominada *Wickelstaken* que consiste en elementos formados con paja y barro enrollados alrededor de una estaca de madera como se ve en las figuras 9.4-1 y 9.4-2. Esta técnica requiere menos trabajo que el bahareque y tiene la ventaja que al endurecer casi no aparecen fisuras de retracción.

Se emplean dos sistemas principalmente: se sumerge la estaca cubierta de paja en el barro sacándola con un movimiento giratorio o una estera de paja embebida en barro se enrolla en una estaca (Fig. 9.4-2). El trabajo que requieren estas técnicas es mayor que la técnica del *Stranglehm* (barro extruido) (ver sección 8.4). En el Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) de la Universidad de Kassel, Alemania, se probó una variante de esa técnica. Para ella se utilizó una mezcla con alto contenido de arena gruesa que se aplicó a una malla metálica o plástica (comúnmente utilizadas para reforzar revoques).

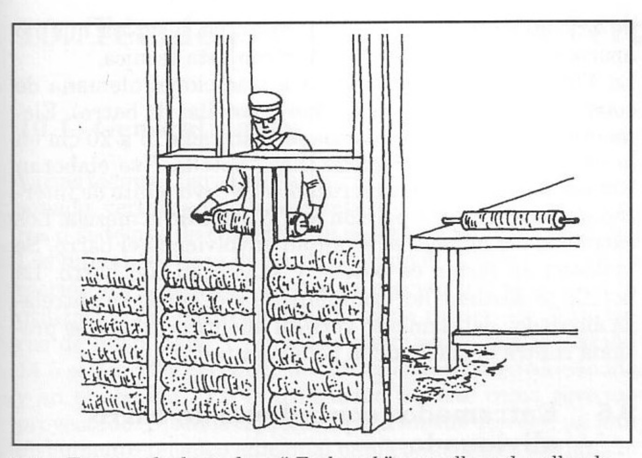
El mortero de barro se aplicó sobre la malla con un espesor de aproximadamente 2 cm en ambas caras y se enrolló alrededor de un palo de bambú formando así el elemento



9.2-4 Sistema prefabricado para bahareque en Brasil



9.3-1 Proyección mecánica de barro alivianado



9.4-1 Entramado de madera *" Fachwerk"* con relleno de rollos de barro y paja *"Wickelstaken"* (según Houben, Guillaud, 1984)



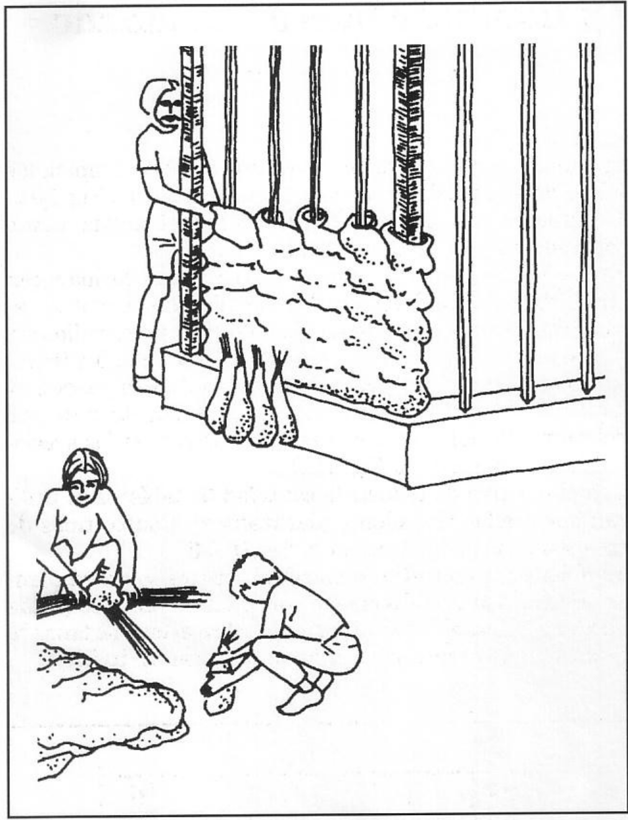




9.4-2 Elaboración de los rollos de paja y barro *"Wickelstaken"* (según Vorhauer, 1979)



9.4-3 a 9.4-5 Método moderno para la elaboración de los rollos de paja y barro *"Wickelstaken"* (FEB)



9.4-6 Método tradicional de hacer botellas de barro

de relleno (Fig. 9.4-3 a 9.4-6). Fue una sorpresa que no aparecieran fisuras de retracción con esta técnica.
La Fig. 9.4-6 muestra la técnica tradicional alemana de construcción con *"Lehmflaschen"* (botellas de barro). Elementos verticales secundarios se fijan cada 15 a 20 cm en la estructura del entramado. Las "botellas" se elaboran con manojos de paja entrecruzados en cuyo punto de intersección se coloca una porción de 1,5 litros de la mezcla. Los extremos del manojo se levantan envolviendo el barro. Se moldean en forma de botella y se cubren con barro. La botella se sostiene horizontalmente y el cuello se entrelaza alrededor del elemento vertical mientras la base se presiona contra el cuello de la botella anterior.

9.5 Entramados con relleno de barro alivianado

Las técnicas tradicionales descritas en las secciones anteriores no pueden utilizarse en las construcciones modernas en climas fríos debido a que no proveen suficiente aislamiento térmico. Para proveer aislamiento térmico los entramados pueden rellenarse con mezclas de barro alivianado (o recubrimientos exteriores con capas de materiales comúnmente utilizados para aislamiento térmico). Esta técnica tiene la ventaja de requerir menos trabajo y no presentar fisuras de retracción. Sistemas que proveen mayor aislamiento térmico se muestran en la sección 14.2.1. Los aditivos alivianados se describen en las secciones 4.7.2 a 4.7.4

9.6 Rellenos con barro extruido y con mangueras rellenas de barro alivianado

Soluciones modernas de relleno de aberturas en entramados, con barro extruido o mangueras rellenas de barro alivianado se describen en la sección 8.4 y 10.7.

10. Técnicas para apisonar, verter y bombear barro alivianado

10.1 Generalidades

Varias técnicas para utilizar barro alivianado mediante apisonado, vertido y bombeado para la ejecución de pisos, muros o sistemas de cubiertas se describen en este capítulo. Los diferentes tipos de barro alivianado se describen en la sección 4.7, mientras que en la sección 9.5 se explica la utilización del barro alivianado como relleno en estructuras de entramado y esqueleto de madera. En la sección 14.5 se describe el relleno de cubiertas con barro alivianado y en el sección 11.5 la utilización de este como revoque proyectado. Diseños especiales para muros que dan un alto aislamiento térmico adicional empleando barro alivianado se describen en la sección 14.2.1, y medidas adicionales de aislamiento térmico utilizando barro alivianado en la sección 13.6.

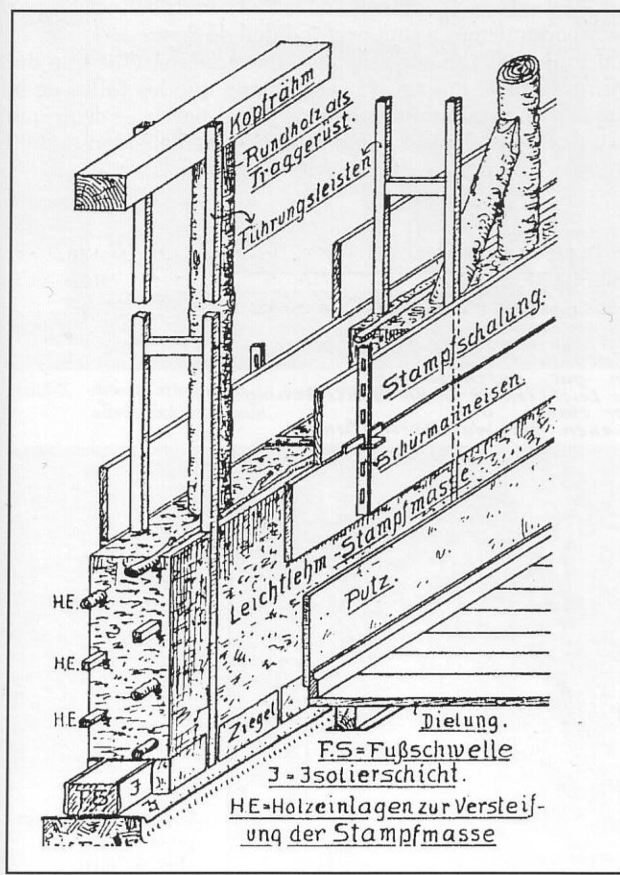
10.2 Encofrados

Los muros de barro alivianado pueden ser construidos con cualquier tipo de encofrado, debido a que el impacto del apisonado para esta técnica es menor que el del tapial, las tablas del encofrado pueden ser más delgadas. La Fig. 10.2-1 muestra un sistema utilizando escaleras como separadores propuesto por Fauth (1946).

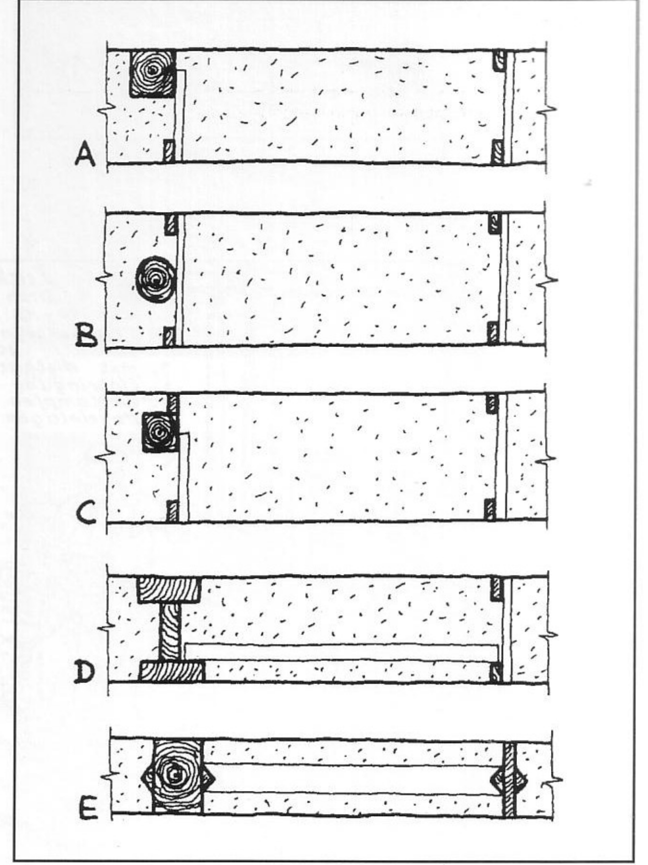
Ya que los separadores en forma de escaleras permanecen en el muro, los tableros pueden ser fijados por ambas caras o fijados directamente empleando clavos o tornillos sin necesidad de crear huecos como es lo usual con los travesaños en el tapial (ver capitulo 5). Los tableros pueden fijarse a los elementos portantes que se encuentran dentro del muro. Posibles variaciones se muestran en las secciones horizontales de la Fig. 10.2-2.

Con el objetivo de reducir la cantidad de tableros se utilizan encofrados trepadores (deslizantes). Cuatro tipos de esos sistemas se ilustran en la Fig.10.2-3.

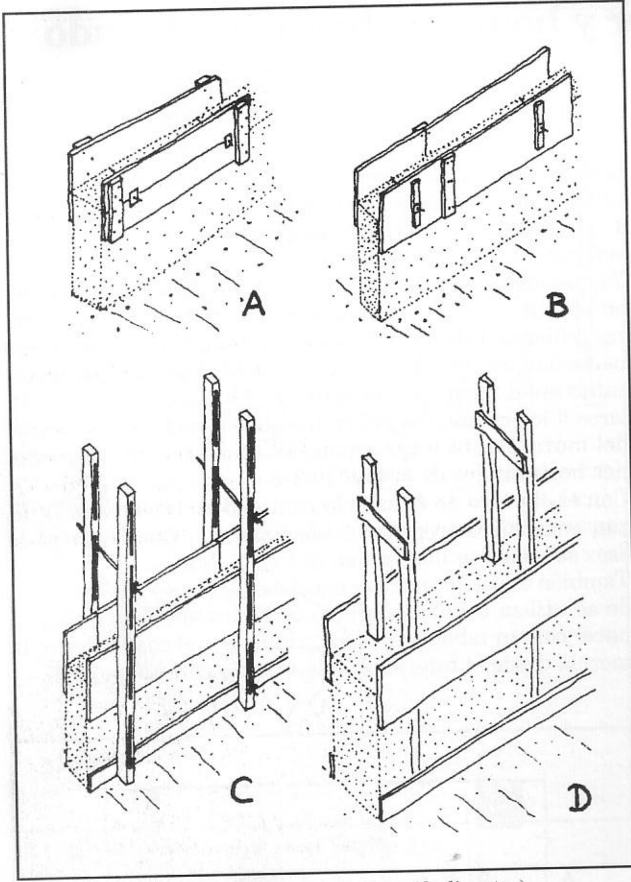
También es posible utilizar encofrado en una sola cara cuando se utiliza barro alivianado con mineral. Esto se puede hacer con un tablero en el exterior sobre el cual se lanza la mezcla desde el interior con la mano o con un badilejo.



10.2-1 Encofrado tradicional para tapial de barro alivianado con paja (Fauth, 1946)



10.2-2 Secciones horizontales mostrando distintos elementos de madera para fijar el encofrado



10.2-3 Sistemas de encofrados trepadores (deslizantes)

10.3 Muro de tapial de barro alivianado con paja

La Fig. 10.3-1 ilustra como se organiza una obra para mezclar, transportar y apisonar barro con paja en un muro. La preparación de la mezcla se describe en la sección 4.7.2. La mezcla se lanza en el encofrado a mano o más usualmente con una horca en capas de 10 a 20 cm de espesor y se compacta con pisones manuales livianos.

La parte superior del muro (debajo de la viga) se forma compactando sólo por una cara, donde el encofrado debe dejarse abierto como se muestra en la figura 10.3-2.

Se debe tomar en cuenta que el barro alivianado tiende a asentarse y así los huecos que se forman deben ser revisados y rellenados posteriormente. El elemento de ensayo de 1 m de altura que se puede ver en la Fig. 10.3-3 mostró un asentamiento de 9%.

Cuando se trabaja con mezclas muy livianas con densidades por debajo de 600 kg/m3 y con muros de más de 25 cm de espesor la paja puede descomponerse en el interior del muro. La Fig. 10.3-4 muestra un ejemplo de un muro de 30 cm de espesor, construido con barro alivianado con una densidad de 350 kg/m3. Luego de algunos meses cuando el exterior parecía completamente seco, se perforó el muro hasta el centro para una instalación eléctrica y se encontró que la paja estaba en estado de descomposición. Incluso los elementos estructurales de madera fueron atacados por microorganismos a una profundidad de 2 cm.

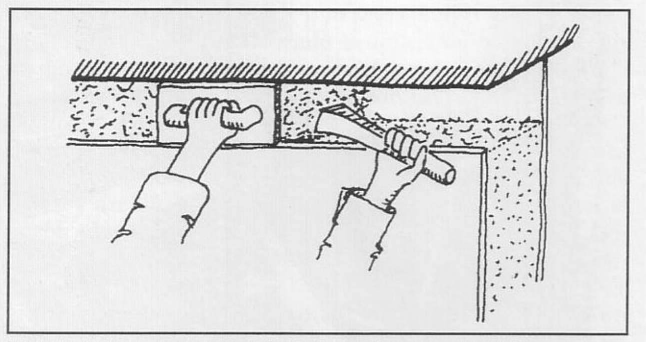
En muros alivianados pueden aparecer insectos que devoran la paja. Por eso se recomienda que los tallos de la paja estén totalmente cubiertos por el barro, es decir que la mezcla debe tener como mínimo una densidad de 600 kg/m^3.



10.3-1 Organización de un proceso para una obra de barro alivianado (Fauth, 1948)

10.4 Muro de barro aliviando con chips de madera

Hoy en día, se utilizan comúnmente chips de madera y aserrín en vez de paja como agregados livianos. Son más fáciles de mezclar con el barro pero dan un efecto de aislamiento térmico menor y necesitan un mayor tiempo de secado.



10.3-2 Relleno y compactado de la sección superior del muro (según Vollhard, 1983)



10.3-3 Asentamiento de un muro de ensayo hecho de barro alivianado con paja.



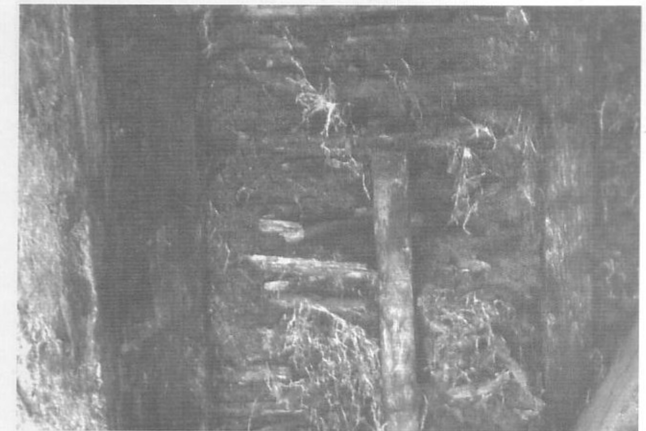
10.3-4 Parte interior en estado de descomposición de un muro de barro alivianado con paja

La figura 10.4.1 muestra un muro de 50 cm de espesor perteneciente a una construcción antigua restaurada en la que las partes de madera fueron totalmente destruidas por hongos debido a que el tiempo de secado de barro alivianado con madera fue muy extenso.

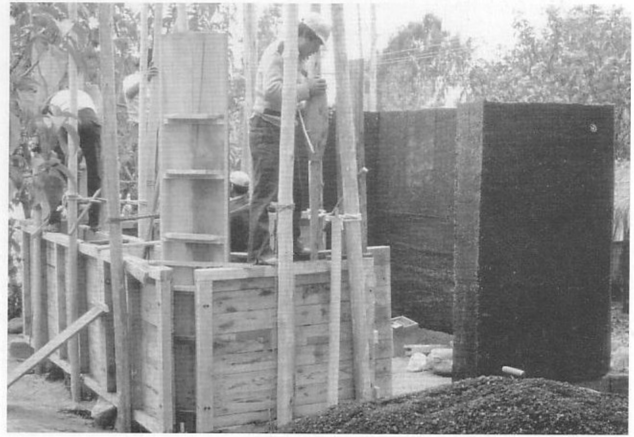
10.5 Muros de barro bombeado alivianado con aditivos minerales

10.5.1 Generalidades

El barro alivianado con minerales se puede compactar en un encofrado como el barro con paja. También puede ser bombeado si la consistencia es la adecuada.
Este absorbe menos agua y por ello seca más rápido, muestra poco crecimiento de hongos, tiene mayor resistencia después del secado, mayor resistencia a la difusión del vapor y mayor dureza en la superficie que el barro alivianado con paja o con madera. En la sección 4.7.3 se describen diferentes agregados minerales alivianantes.



10.4-1 Muro de barro alivianado con chips de madera, destruido por los hongos.



10.5-1 Apisonado de un muro de barro y piedra pómez Pujil., Ecuador

10.5.2 Muros compactados

La Fig. 10.5-1 muestra la construcción de una edificación en Pujili, Ecuador, utilizando piedra pómez como agregado alivianante mezclado con barro y ligeramente compactado en un encofrado. El encofrado se desmontó inmediatamente después de terminar el muro. El muro mostró una alta resistencia aún cuando seguía siendo posible cortar aberturas de ventanas y formar dinteles con un machete como se muestra en la Fig. 10.5-2



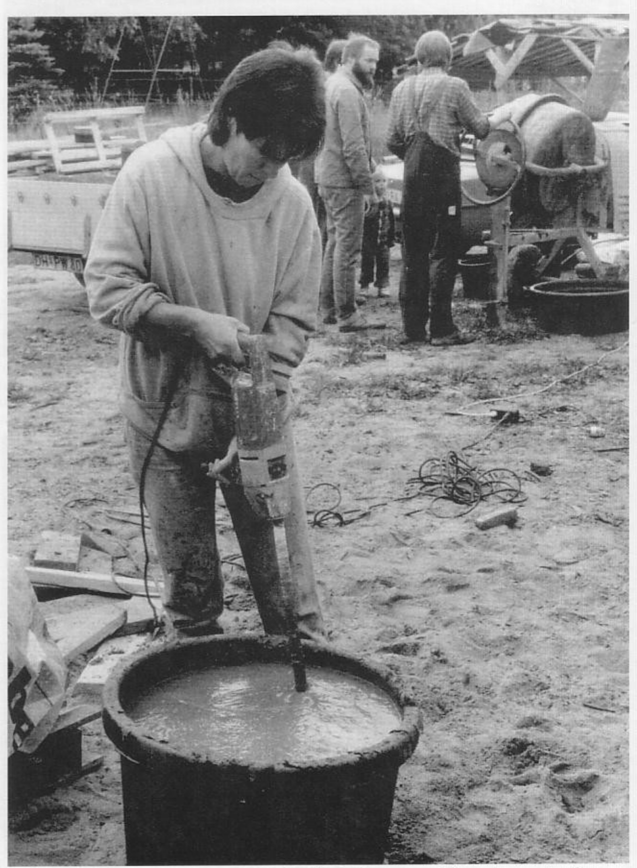
10.5-2 Moldeado de un vano con un machete



10.5-3 Mezclado de barro alivianado con mineral



10.5-4 Vertido de barro alivianado con mineral



10.5-5 Preparación de una lechada de barro utilizando una mezcladora eléctrica manual

10.5.3 Muros de barro vertido

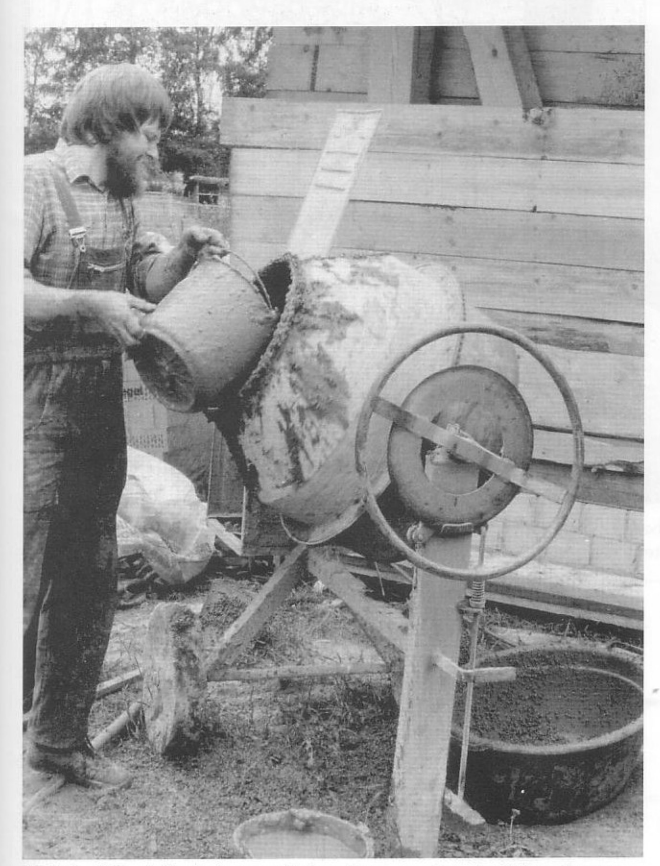
La forma más simple de hacer un muro de barro alivianado con mineral es simplemente verterlo en un encofrado (Fig. 10.5-4). En este caso, la mezcla se prepara en una mezcladora de fuerza Fig. 10.5-3. Con esta técnica es también posible utilizar una mezcladora de hormigón en la que la lechada de barro es vertida sobre el agregado mineral Fig. 10.5-6.
La lechada se preparó con una mezcladora eléctrica manual Fig. 10.5-5. El encofrado se deja simplemente abierto en una cara de la parte superior del muro, la mezcla se vierte y después se compacta con un pisón de madera plano.
En una vivienda de dos pisos en Tata, Hungría, un muro portante de 50 cm de espesor se hizo con una mezcla de barro y arcilla expandida. La mezcla fue bombeada en el encofrado con un embudo transportado por una grúa, método comúnmente utilizado en la construcción con hormigón (Fig. 10.5-7).
Un método simple para reducir los costos es utilizar un encofrado perdido de caña en una o en ambas caras Fig. 10.5-8.
Las Figs. 10.5-9 a 10.5-11 muestran un encofrado de tela perdido, diseñado por el autor. Una tela se tensa con cables fijados a la estructura de madera. Esto da una idea de la ilimitada y creativa cantidad de texturas de superficies que se pueden obtener.

10.5.4 Muros bombeados

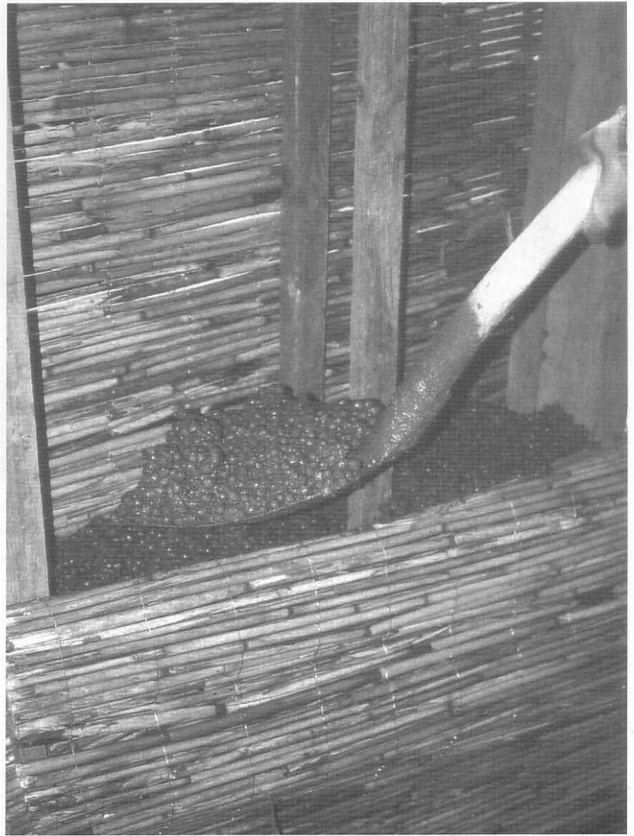
Para proyectos de mayor magnitud, especialmente si hay empresas que se encarguen del barro alivianado con mineral se recomienda bombear la mezcla en el encofrado utilizando bombas de mortero u hormigón.



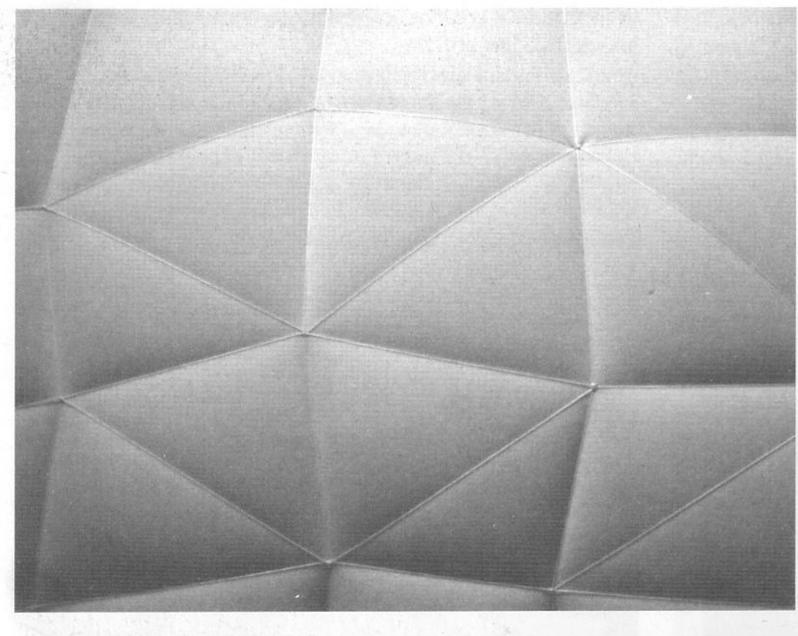
10.5-7 Transporte y vertido de barro aliviando con mineral

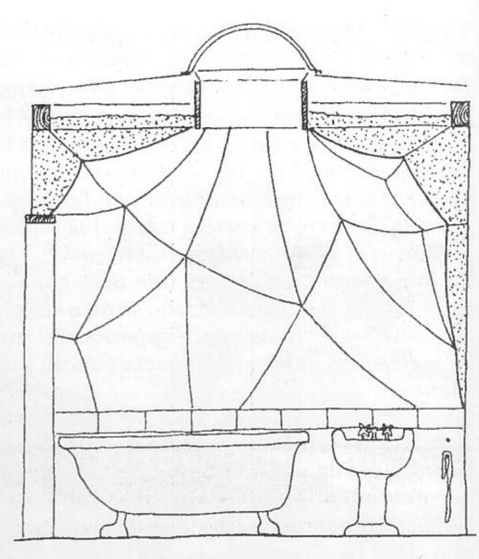


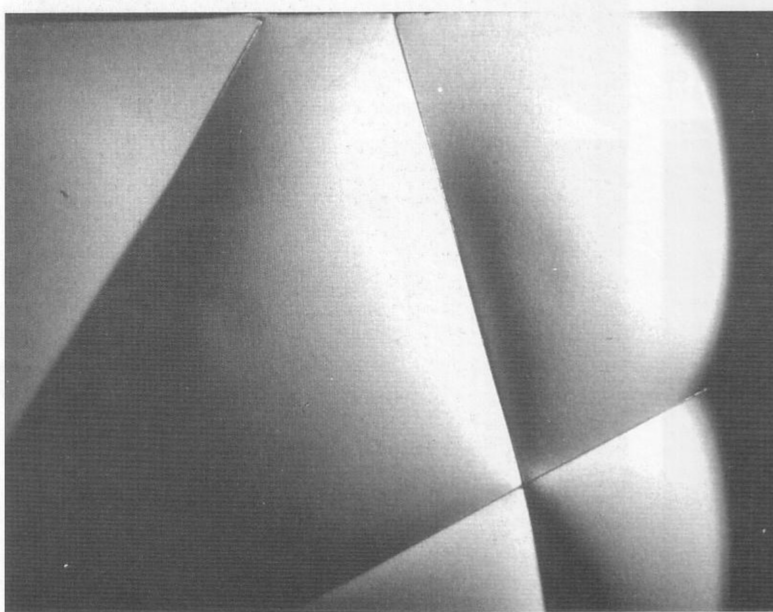
10.5-6 Mezclado de barro alivianado con mineral utilizando una mezcladora común de concreto

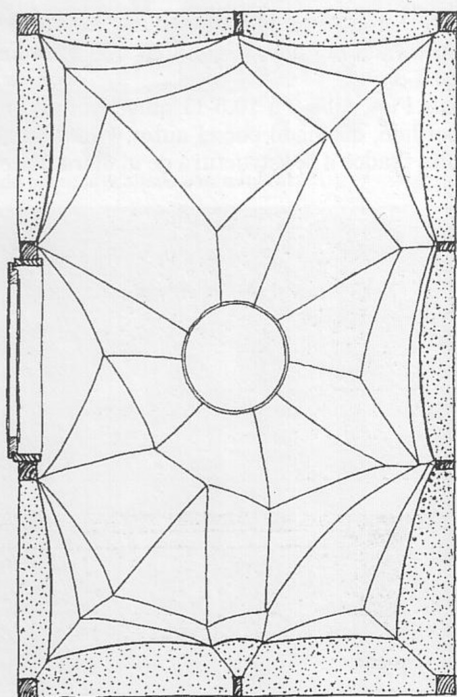


10.5-8 Vertido de barro aliviando con mineral en un encofrado perdido









10.5-9, 10.5-10 Modelos de estudio para muros interiores utilizando barro alivianado con mineral y encofrados perdidos de tela tensada con cables.

10.5-11 Secciones vertical y horizontal que muestran el techo de un baño con tragaluz central

Para ello la consistencia debe ser más líquida que para el vertido. Se puede bombear desde una altura de 2 pisos utilizando mangueras. La Fig. 10.5-12 muestra una vivienda de entramado de 300 años de antigüedad restaurada en Alemania, donde la mezcla se preparó en una mezcladora móvil y luego fue bombeada hacia el encofrado.

10.5.5 Tratamiento de superficie

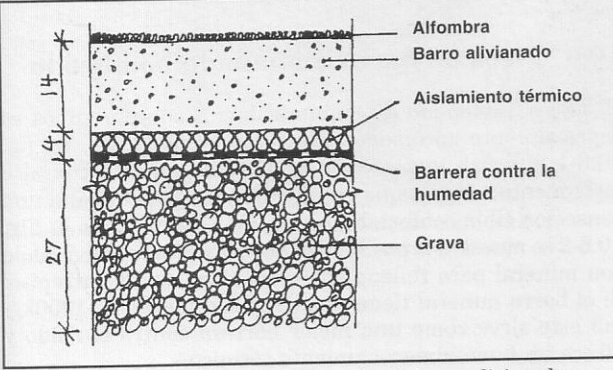
Luego de desmontar el encofrado las superficies de muros de barro apisonado, vertido o bombeado con densidades de 600 a 900 kg/m3 tienen una apariencia sólida aunque áspera (Fig. 10.5-13).
La superficie solo requiere ser revocada con una capa fina a diferencia de los muros de barro alivianado con paja que requieren por lo menos dos capas de revoque. Un muro de barro alivianado con mineral de una densidad de 1000kg/m^3 raspado después de desmontar el encofrado se muestra en la Fig. 10.5-14. Se obtiene una hermosa textura rugosa que solo requiere ser pintada posteriormente sin necesidad de revoque.



10.5-12 Transporte y bombeo de barro alivianado con mineral



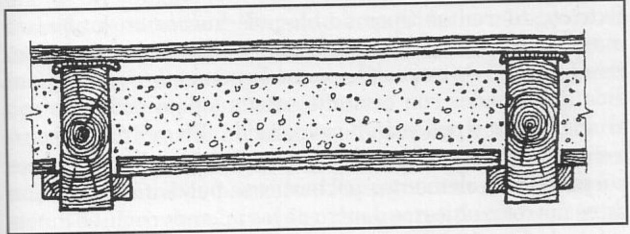
10.5-13 Superficie de un muro de barro alivianado hecho con barro arcilloso y arcilla expandida (8 a 16 mm) luego de desmontar en encofrado



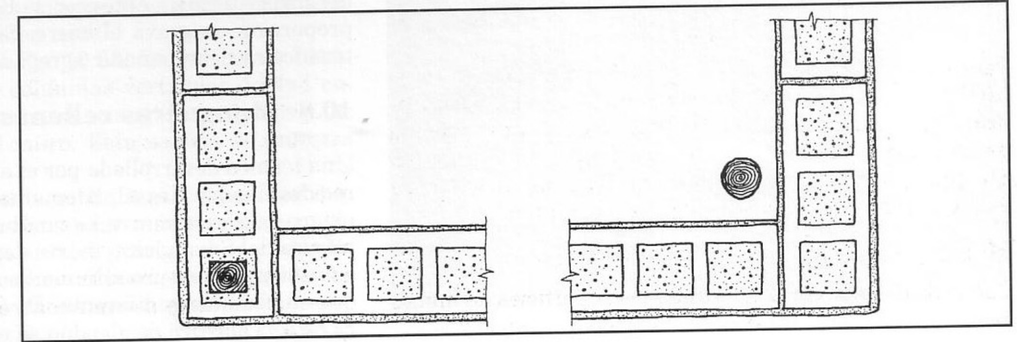
10.6-1 Sección vertical de un piso hecho de barro alivianado con arcilla expandida



10.5-14 Raspado de una pared de barro alivianado con arcilla expandida para obtener una superficie con textura sin revoque



10.6-2 Barro alivianado con mineral utilizado como relleno en un entrepiso de madera



10.7-1
Bloques rellenos con tierra formando una esquina, con la columna estructural en diferentes posiciones.


10.8-1 Relleno manual de mangueras con barro alivianado con mineral utilizando una bomba


10.8-2


10.8-2, 10.8-3 Relleno de mangueras con barro alivianado con mineral utilizando un embudo

10.6 Pisos de barro alivianado bombeado

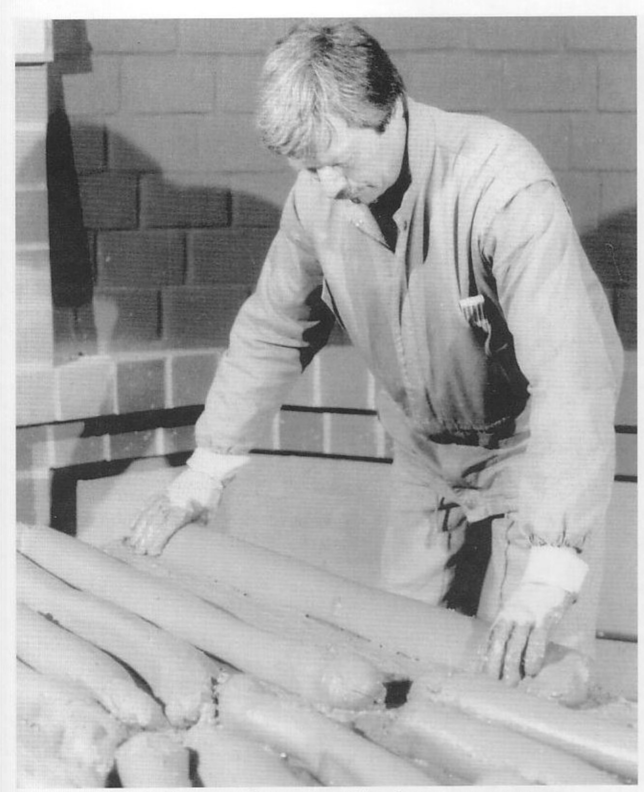
El barro alivianado con mineral bombeado por tubos es especialmente apropiado para pisos y entrepisos. La fig. 10.6-1 muestra una sección vertical de un piso con alto aislamiento térmico que en un clima frío proporciona una sensación tibia confortable al caminar sobre el. En la Fig. 10.6-2 se muestra la posibilidad de utilizar barro alivianado con mineral para relleno entre las vigas de un entrepiso. Si el barro mineral tiene una densidad mayor de 1000kg/m3 este sirve como una mejor barrera contra el ruido y ofrece un buen almacenamiento térmico.

10.7 Bloques rellenos con barro

Existen diferentes tipos de bloques huecos en los países industrializados que usualmente se llenan de hormigón. Están hechos de materiales como la pómez o arcilla expandida aglutinados con cemento, arena aglomerada con cal, arcilla cocida o poliestireno expandido. En vez de rellenarlos con hormigón se puede utilizar barro si el muro no es portante. Los elementos portantes se pueden integrar con estos muros o ubicarse dentro de los mismos como se muestra en la Fig. 10.7-1.
Si se requieren un alto aislamiento acústico y una buena capacidad térmica entonces se debe adicionar una mayor proporción de grava al barro. Si se requiere aislamiento térmico se deben añadir agregados alivianantes.

10.8 Mangueras rellenas con barro

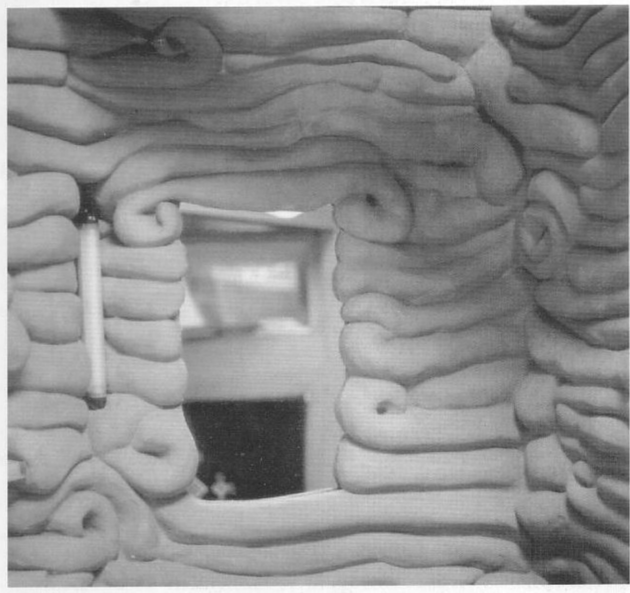
Una técnica desarrollada por el autor fue utilizada en tres residencias en Kassel, Alemania en 1992. La apariencia externa de esos muros es similar a los realizados con la técnica del Stranglehm (barro extruido) descrita en la sección 8.4, pero el procedimiento de producción, manejo y colocación es muy diferente. En esta técnica una manguera de tela elástica de algodón se rellena con una mezcla de



10.8-4 a 10.8-6 Proceso de construcción de un muro para un baño con mangueras de barro alivianado



10.8-5



10.8-6

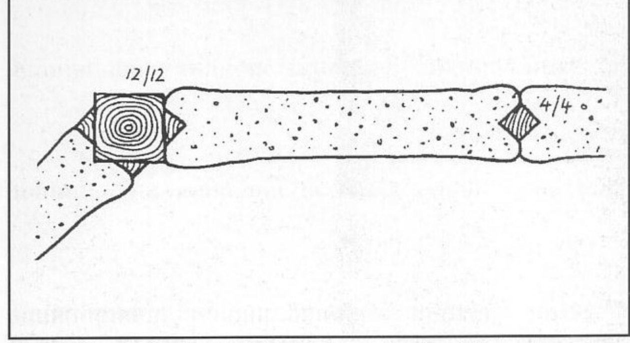
barro alivianado con mineral. La manguera puede rellenarse con una bomba (ver Fig. 10.8-1) o a mano mediante un embudo (ver Fig. 10.8-2 y 10.8-3)

Cuando se alcanza la longitud requerida la manguera se corta y los extremos se cierran haciendo un nudo. Estas mangueras rellenas pueden ser fácilmente manipuladas debido al refuerzo que ofrece la tela.

Antes de colocarlas en el muro deben ser frotadas con la mano para que el barro cubra la tela. Cuando se apilan estos elementos de barro se adhieren entre sí (Fig. 10.8-4 a 10.8-5). Debido a que estas mangueras pueden ser moldeadas fácilmente sin roturas se pueden crear modelos escultóricos muy atractivos (ver Fig. 10.8-6, 10.8-8 y 10.8-9). Luego en estado húmedo la superficie puede ser alisada con una brocha empapada en agua.

En el muro mostrado en la Fig. 10.8-9 mangueras de 70 cm de largo se apilan entre columnas verticales de 4x4 cm rotadas a 45°, o entre elementos triangulares fijados a las columnas principales del muro. Esta sección se muestra en la Fig. 10.8-7.

Usualmente se pueden colocar de 3 a 5 capas por día, pero con el objetivo de poder apilar más capas, se puede añadir cemento para acelerar el proceso de secado. La sección 13.6.5 explica como estas mangueras pueden ser utilizadas con el objetivo de incrementar el aislamiento térmico.



10.8-7 Sección horizontal de un muro estructural de madera rellenado con mangueras de barro alivianado

10.8-8 Muro de un invernadero hecho con mangueras rellenas con barro que almacenan calor y balancean la humedad

10.8-9 Muro interior hecho con mangueras rellenas con barro

11. Revoques de barro

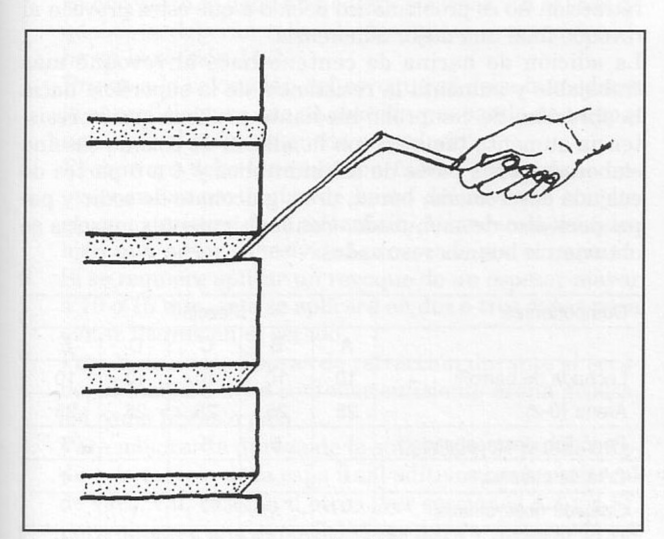
11.1 Generalidades

Los revoques de barro están compuestos principalmente por arena y limo, con solo la cantidad de arcilla que sea necesaria (usualmente entre 5 a 12%) para activar la cohesividad y la adherencia. Es difícil establecer cuales deberían ser las proporciones ideales para un revoque de barro, ya que no solo influyen en las propiedades las proporciones de arena, limo y la arcilla, sino principalmente la granulometría de la arena, el contenido de agua, el tipo de arcilla, la forma de preparación, el tipo y la cantidad de los aditivos. Por ese motivo es necesario hacer revoques de prueba con mezclas variadas para poder determinar cual es la más adecuada.

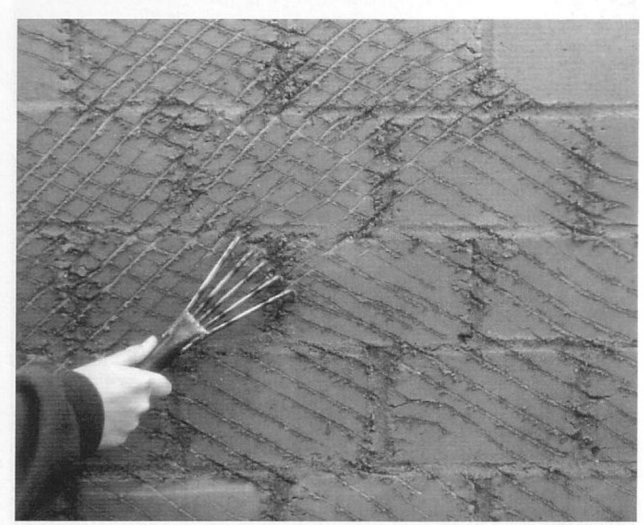
Los revoques de barro se adhieren muy bien y se pueden aplicar tanto sobre superficies de barro, ladrillos, piedra natural y hormigón. Lo importante es que la superficie sea suficientemente rugosa. La cualidad de los revoques de barro para equilibrar la humedad interior se describió en la sección 1.4.

11.2 Preparación de la superficie

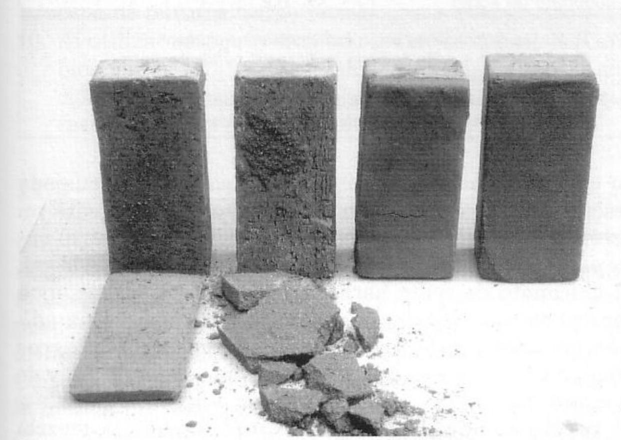
Debido a que el revoque de barro no reacciona químicamente con la superficie donde se aplica, la superficie debe ser suficientemente rugosa con el objetivo de obtener una buena adherencia física. Si se va a revocar en mampostería especialmente cuando se emplean adobes grandes y lisos se recomienda que se hagan ranuras a 45° con un badilejo como se muestra en la Fig. 11.2-1. Otro método para obtener una buena adherencia del revoque sobre paredes de barro es humedecer la superficie hasta que se suavice y posteriormente rayar diagonalmente (Figs. 11.2-2 y 11.2-3).



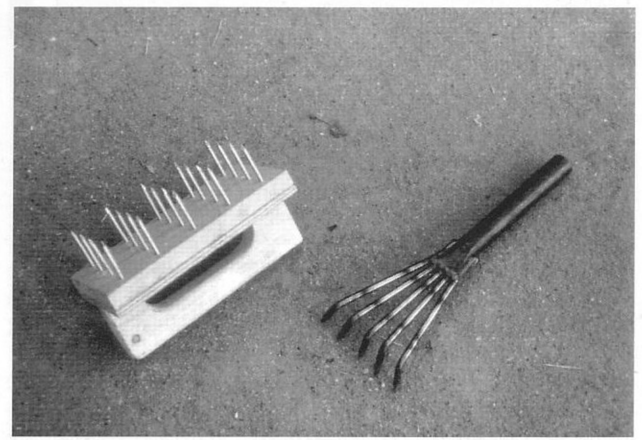
11.2-1 Corte de las juntas con un badilejo



11.2-2 Rayado de una superficie húmeda de barro



11.3-1 Ensayo de adherencia de morteros de barro



11.2-3 Herramientas para rayar superficies húmedas de barro

11.3 Composición del revoque

11.3.1 Generalidades

Para obtener un revoque de barro sin fisuras, se deben tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- El barro debe contener suficiente arena gruesa.
- Al barro se le pueden añadir pelos humanos o de animales, fibras de coco o sisal, paja o heno desmenuzado (aunque demasiada cantidad de estos aditivos reduce la adherencia del revoque sobre la superficie).
- Para revoques interiores granzas de cereal, aserrín o fibras de celulosa o similares pueden emplearse como aditivos.
- Con la finalidad de obtener una buena cohesividad, las fuerzas adhesivas de los minerales de arcilla deben activarse suficientemente mediante una cantidad adecuada de agua y amasado.
- Cuando el revoque se adhiere a un badilejo metálico colocado en posición vertical sin despegarse y si al lanzarlo sobre la pared se despega del badilejo se ha obtenido entonces una consistencia correcta.

Como prueba previa para comprobar las características de un revoque de barro se puede hacer un ensayo muy sencillo de adhesión. En él se aplica el revoque con un espesor de 2 cm sobre la superficie de un ladrillo liso. El revoque debe quedarse pegado al ladrillo colocado de parado, hasta su secado total lo cual puede tomar de 2 a 4 días.
Si se desprende por si mismo en una sola pieza, como se ve en la muestra de la izquierda de la Fig. 11.3-1 entonces contiene mucha arcilla y se debe rebajar con arena gruesa. Si se desprende en pedazos al golpear el ladrillo con un martillo, como se observa en el segunda muestra de la Fig. 11.3-1 entonces no posee la suficiente cohesividad y se debe enriquecer con arcilla. Si se queda pegado y muestra fisuras finas como en la tercera muestra de la Fig. 11.3-1 entonces es arcilloso y debe ser ligeramente rebajado con arena gruesa. Sin embargo, este puede ser empleado sin rebajarlo en la primera capa de un revoque de dos capas. Si la superficie no muestra fisuras y no se desprende al golpear el ladrillo con un martillo como se observa en la muestra de la derecha de la Fig. 11.3-1 entonces la mezcla es adecuada. Se recomienda con esta mezcla la realización de una muestra de 1 m de ancho y 2 m de altura sobre la superficie a revocar. Si aparecen fisuras se debe ya sea rebajar con arena gruesa o mezclarse con fibras.

11.3.2 Revoques exteriores

Los revoques exteriores expuestos a las inclemencias del tiempo deben ser resistentes a los cambios climáticos o deben protegerse mediante la aplicación de pinturas impermeables. Es importante en climas fríos que el revoque exterior y la pintura tengan una buena resistencia a la difusión del vapor para que el agua condensada en el muro pueda ser fácilmente transportada hacia el exterior. El revoque exterior debe ser más elástico que la superficie donde se aplicó para poder resistir influencias hídricas y térmicas sin que aparezcan fisuras. Por lo general en climas fríos no se recomiendan revoques externos de barro a menos que se cuente con un adecuado alero, protección del zócalo y una buena pintura impermeable.
Debido a que los bordes de los muros revocados se dañan con facilidad estos deben redondearse o protegerse con un elemento rígido. En la sección 4.2, 4.3 y 4.6 se describieron muchas posibilidades para reducir la retracción, aumentar la resistencia a las inclemencias del tiempo y la dureza de las superficies.

11.3.3 Revoques interiores

Los revoques interiores de barro son menos problemáticos que los exteriores y usualmente no crean problemas si presentan pequeñas fisuras ya que estas pueden ser selladas con pintura. Las superficies para revoques pueden ser alisadas después del secado con una brocha previamente empapada en agua.
Si la superficie requiere un revoque con un espesor mayor a 15 mm entonces se aconseja aplicar el mismo en dos capas, la primera capa debe contener más arcilla y agregados gruesos que la segunda. Si en la primera capa aparecen fisuras de retracción no es problemático debido a que estas proveen al revoque final una mejor adherencia.
La adición de harina de centeno hace al revoque más trabajable y aumenta la resistencia de la superficie hacia la abrasión. Se comprobó mediante pruebas que la resistencia aumenta también con la adición de cola de caseína elaborada con 1 parte de cal hidráulica y 4 a 6 partes de cuajada descremada, bórax, urea, gluconato de sodio y papel periódico desmenuzado. Con las siguientes mezclas se obtuvieron buenos resultados:

Componentes	Mezcla(1)				
	A	B	C	D	E
Lechada de barro(2)	10	10	10	10	10
Arena (0-2)	25	25	25	25	25
Periódico desmenuzado(3)	-	5	5	-	5
Cola de caseína(4)	1	-	-	-	1
Cuajada descremada	-	-	-	1	-
Urea	-	-	0.2	-	-
Gluconato de sodio	-	0.2	-	-	-

(1) Todas las proporciones están expresadas en volumen
(2) Elaborada con 1 parte de tierra arcillosa y 2 partes de arena
(3) Tratado con bórax
(4) Elaborada con 4 partes de cuajada descremada, 1 parte de cal hidráulica y mezclada intensamente durante dos minutos

La cal reacciona con la caseína que contiene la cuajada descremada formándose un albuminato de cal, agente resistente al agua. Una reacción química similar ocurre entre el bórax (contenido en periódico desmenuzado) y la cal. El gluconato de sodio hace que se requiera menos agua para el amasado (reduciendo así la retracción). Una adición de urea puede provocar especialmente en barros limosos un incremento de la resistencia a compresión y de la resistencia a la flexión (ver sección 4.5).
El papel periódico desmenuzado provoca que la mezcla se sea más trabajable y reduce la retracción. Las mezclas

B, C y E resultaron ser más trabajables. Para las mezclas A y E, es preferible mezclar primero la cola de caseina y el papel periódico desmenuzado con el agua, dejar reposar esta mezcla por una hora y luego añadir el barro y la arena.
Se encontró con todas las mezclas que el frotado y el alisado de la superficie, era mejor si se efectuaba luego de algunas horas o incluso un día.

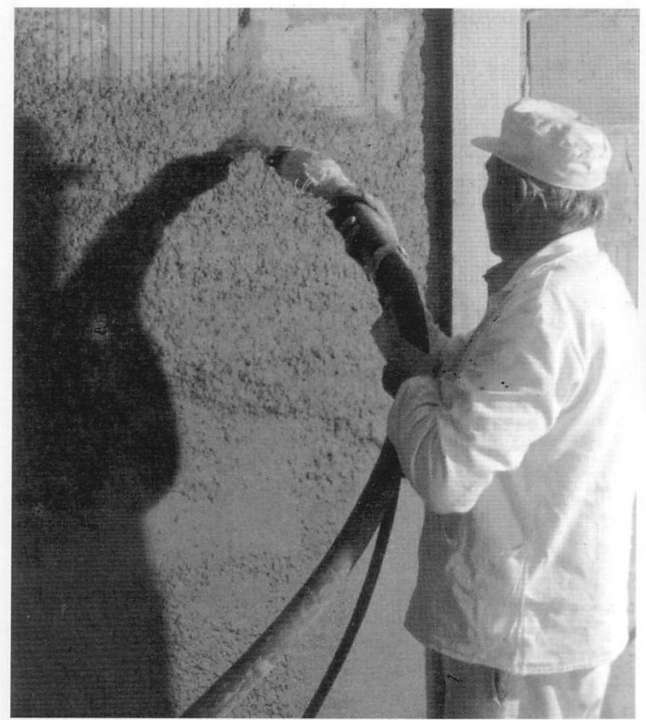
11.4 Reglas para la aplicación de revoques

Ya que el revoque de barro puro no reacciona químicamente con la superficie en la que se aplica, es necesario tratar esta de tal manera que se obtenga una buena adherencia. Para ello, se deben tomar en cuenta las siguientes recomendaciones:

1. La superficie de barro a ser revocada debe estar suficientemente seca para que no haya más retracción.
2. Todo el material suelto debe ser quitado raspando la superficie.
3. La superficie debe ser suficientemente rugosa. Si fuera necesario se debe humedecer y raspar. En el caso de adobes se deberán rehundir las juntas como se describe en la sección 11.2.
4. Previa a la colocación del revoque se debe humedecer la superficie para que se ablande y expanda de tal manera que el mortero pueda adherirse.
5. El mortero debe lanzarse con fuerza para que se impregnen las partículas de barro del revoque con las capas exteriores de la superficie. Alcanzando así también una mejor cohesividad provocada por el impacto.
6. Si se requiere aplicar un revoque de un espesor mayor a 10 o 15 mm, este se aplicará en dos o tres capas para evitar fisuras en el secado.
7. Para reducir las fisuras de retracción durante el secado, el mortero debe contener suficiente arena gruesa, así como fibras o pelo.
8. Para mejorar la dureza de la superficie, se puede añadir a la mezcla de la capa final aditivos como estiércol de vaca, cal, caseina u otros (ver secciones 4.3 y 4.6).
9. Para obtener una superficie más dura y mejorar la resistencia a la abrasión húmeda, se debe aplicar una capa de pintura.
10. Al utilizar revoques se deben tomar en cuenta los cambios de las propiedades físicas provocados por la adición de aditivos o pinturas especialmente respecto a la resistencia a la difusión del vapor.

11.5 Barro proyectado

Un revoque proyectable de barro alivianado con papel periódico desmenuzado y con un alto aislamiento térmico, fue desarrollado exitosamente por el autor en 1984. Este puede ser aplicado en capas desde un espesor de 30 mm, utilizando una bomba común para revoque (Fig. 11.5-1). Con el objetivo de reducir el tiempo del curado, se añadió a la mezcla un poco cal y yeso. Otros revoques alivianados proyectables que se emplean para rellenar entramados y estructuras de esqueleto se describen en la sección 9.3.



11.5-1 Revoque proyectado de barro alivianado



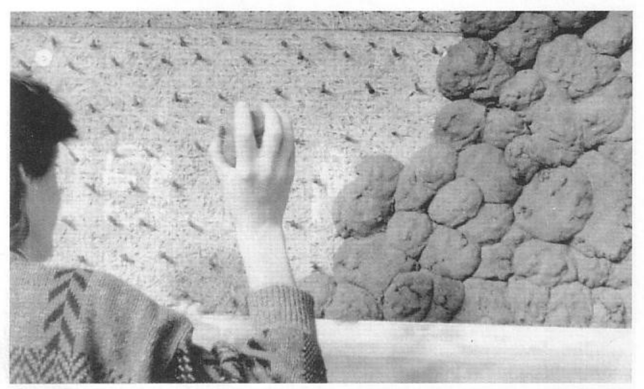
11.6-1 Revoque de barro alivianado con arcilla expandida de 1 a 4 mm

11.6 Revoque de barro alivianado con aditivos minerales

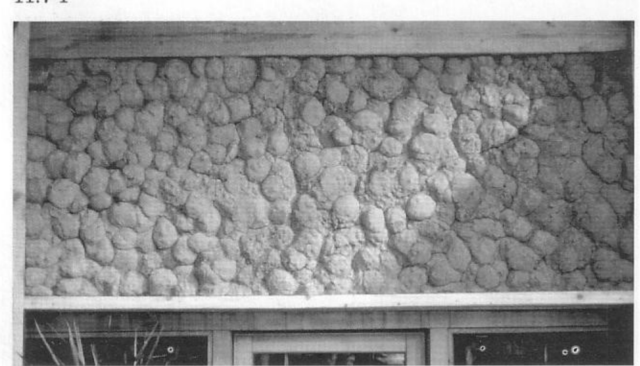
La Fig. 11.6-1 muestra la superficie de un revoque de barro alivianado con arcilla expandida de 1 a 4 mm de diámetro. El barro se estabilizó con 5% de cal altamente hidráulica para reducir el tiempo de curado e incrementar la resistencia a la difusión de vapor. No es fácil alisar la superficie con un badilejo debido a que el agregado tiende a desprenderse durante el proceso. Para evitar esto se puede añadir papel periódico desmenuzado, harina de centeno o cola de caseína a la mezcla.

11.7 Revoque lanzado

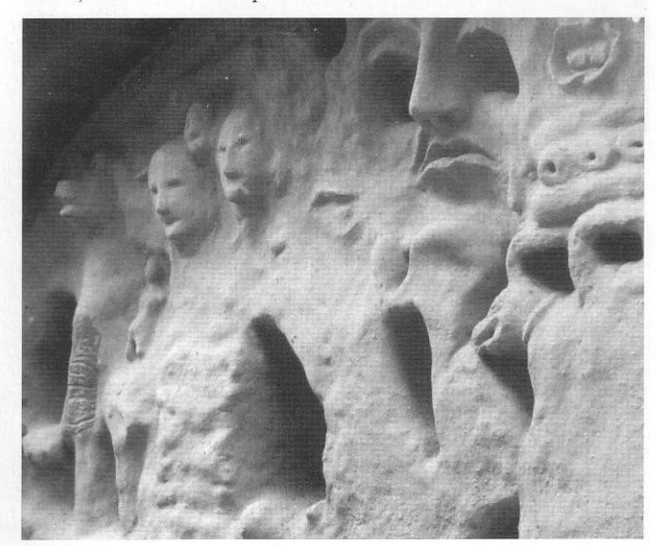
En las Figs. 11.7-1 y 11.7-2 se muestra una técnica africana que consiste en lanzar bolas de barro sobre una pared. Se adaptó esta, sobre un tablero de fibras de madera de un muro en un invernadero para aumentar la capacidad de la pared de almacenar calor y balancear la humedad del aire, descrito en la sección 14.8. Para mejorar la adhesión se colocaron clavos de bambú en el tablero.



11.7-1



11.7-1, 11.7-2 Revoque lanzado en invernadero



11.9-1

11.8 Revoque en muros de fardos de paja

Las viviendas de fardos de paja conocidas en Nebraska, USA desde fines del siglo XIX, experimentaron un resurgimiento en los años 80 del siglo XX. Entretanto en Australia, USA, Hollanda, Francia y Escandinavia se contruyeron muchas viviendas con muros fardos de paja. Muchas viviendas históricas de este tipo poseen muros portantes construidos con esta técnica. Hoy en día, principalmente las construcciones de entramado de madera se rellenan o se rodean con fardos de paja.

El recubrimiento más simple para este tipo de muros es el revoque de barro. La aplicación del revoque puede efectuarse manualmente o con bombas para revoques.

Lo más económico es cubrir la superficie de paja con 2 o 3 capas de barro o en caso de mucha lluvia con un revoque de cal o cal-cemento. Un revoque solo de cemento no es recomendable debido a que es muy frágil. La forma más fácil de aplicar el revoque de barro es lanzarlo o con bombas. En ambos casos se obtiene una superficie desigual debido a la forma y colocación de los fardos. Si se desea una superficie más plana entonces se deben rellenar las juntas y otras asperezas con una mezcla de barro con paja.

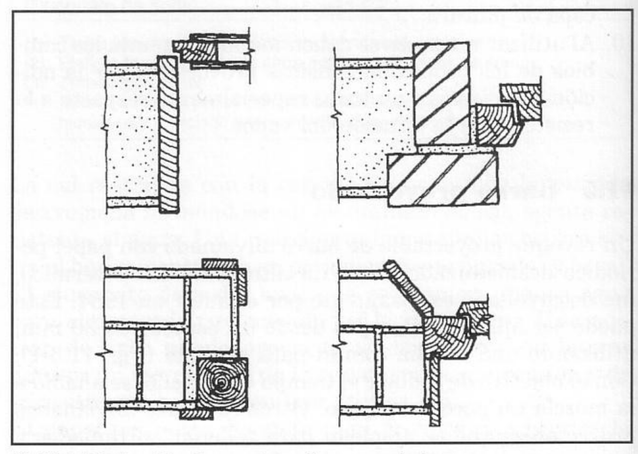
Para más informaciones ver Minke, G.; Mahlke, F.: Building with Straw, Birkhäuser Berlin/Basel, 2004.

11.9 Modelado de revoques de barro en estado húmedo

Debido a que el revoque de barro permanece plástico por un lapso de tiempo largo y ya que no es corrosivo para la piel como la cal o el cemento, es un material ideal para ser modelado con las manos. La Fig. 11.9-1 muestra un ejemplo de un pared exterior modelada y estabilizada con un acabado de cal-caseina.

11.10 Protección de las esquinas

Debido a que los revoques de barro son susceptibles a los impactos mecánicos, las esquinas deben ser protegidas con perfiles de madera, ladrillos cocidos u otros (Fig. 11.10-1).



11.10-1 Protección de esquinas de muros de barro

12. Protección de superficies de barro contra las inclemencias del tiempo

12.1 Generalidades

No es siempre necesario que las superficies de barro tengan aditivos para hacerlas resistentes a las inclemencias del tiempo. Es a veces suficiente proteger o reforzar la superficie con un revoque o pintura. En este capítulo se describen diferentes vías para incrementar la resistencia de las superficies de barro, así como medidas estructurales requeridas para protegerlas.

12.2 Consolidación de la superficie

El método más simple de reforzar una superficie especialmente contra la erosión por lluvia y viento es consolidándola. Esto se puede hacer alisando la superficie con un badilejo de metal ejerciendo presión, cuando este húmeda y ligeramente plástica. Métodos tradicionales hindúes y africanos emplean piedras lisas pero convexas con las cuales se frota la superficie con movimientos circulares y gran presión. El tratamiento es adecuado cuando la superficie se pone brillosa y no quedan visibles poros o fisuras. Aunque esta acción no altera la composición del material se crea una sorprendente resistencia a las inclemencias del tiempo.

12.3 Pinturas

12.3.1 Generalidades

Las pinturas en las superficies expuestas deben ser periódicamente renovadas. La pintura puede ser erosionada físicamente por el viento, el congelamiento o la lluvia o químicamente erosionada por la radiación ultravioleta y la lluvia ácida. Las pinturas exteriores deben ser hidrófobas (repelentes al agua) y al mismo tiempo especialmente para climas fríos deben ser porosas con una red continua de micro-poros con el objetivo de permitir la difusión del vapor hacia el exterior. Por ello el látex y algunas pinturas de dispersión no se recomiendan.
Además de las informaciones contenidas en este capitulo, se puede encontrar más información sobre pinturas en Wehlte (1985).

12.3.2 Preparación de la superficie

Si la superficie es muy limosa y se emplean pinturas a base de cal, la superficie debe ser imprimada con una lechada fina de cal-caseína y posteriormente frotada. El imprimado se puede hacer con cal hidráulica, cuajada descremada (quark en alemán) y agua en proporciones 2:1:15.

12.3.3 Mezclas recomendadas para pintura

Lechada de cal pura
La lechada de cal debe ser muy fina para que pueda penetrar profundamente en la superficie, para que cuando seque no hayan desconchados. Por ello se recomienda aplicar tres o cuatro capas siendo la primera la más líquida. La mezcla se puede hacer con 50 kg. de cal hidráulica disuelta en 60 l de agua. Es generalmente preferible agregar de 1 a 2 kg. de sal de cocina, que al ser higroscópica prolonga el tiempo en el que la mezcla se mantiene húmeda, asegurando un mejor curado de la cal. Debido a que la lechada de cal pura es blanca al secarse, para obtener un color distinto se puede agregar arcilla o polvos de barro u otros pigmentos de tierra resistentes a la cal. La lechada de cal pura no es resistente al efecto de la limpieza.

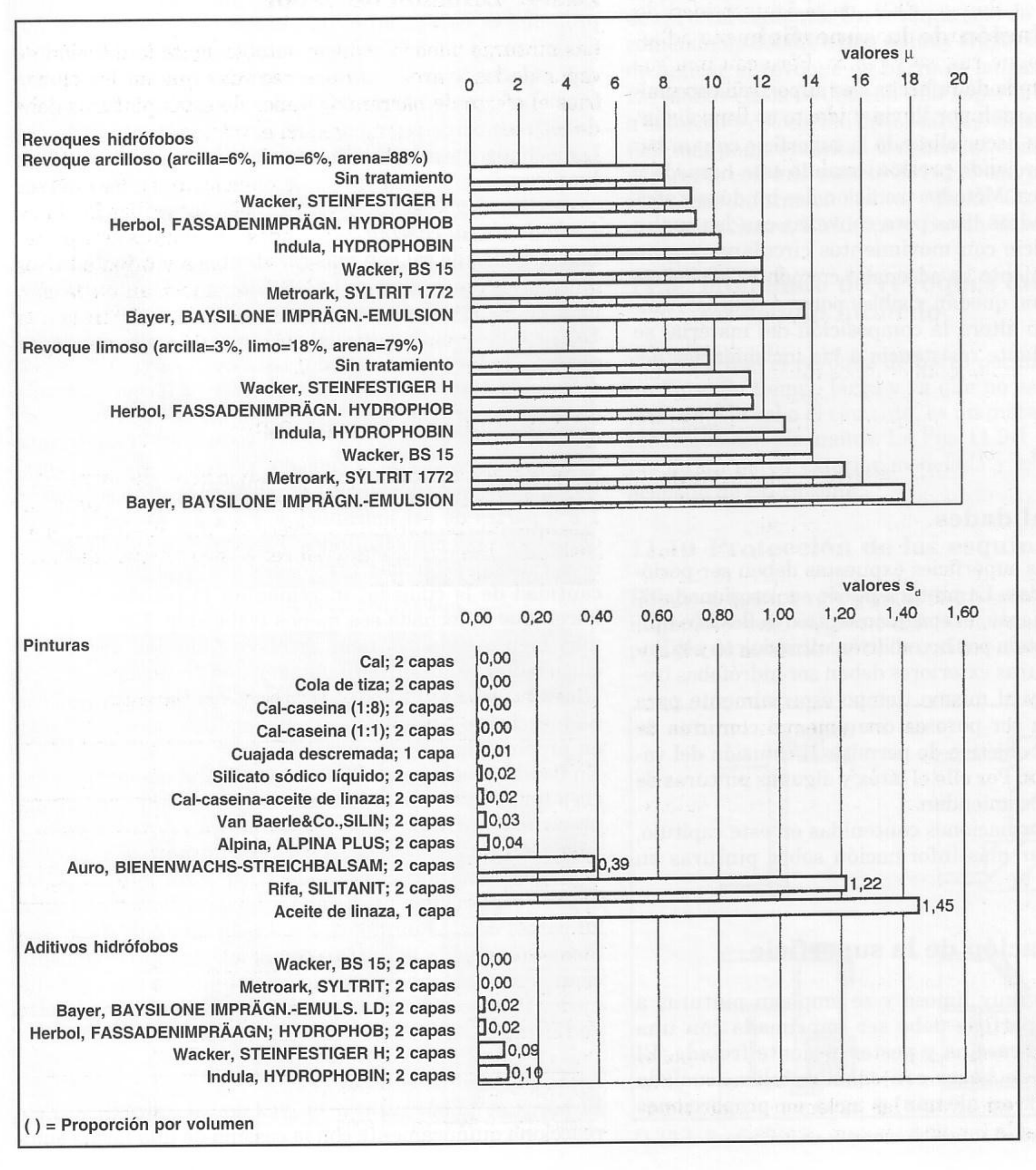
Lechada de cal-caseína
Las lechadas de cal son más resistentes a efecto de la limpieza y son más durables si se les añade suero, cuajada descremada o polvo de caseína .
La cuajada se obtiene cuando el cuajo de reces jóvenes se añade a la leche descremada. Esta cuajada contiene 11% de caseína. La cal combinada con la caseína forma un agente químico impermeable al agua denominado albuminato de cal. En las lechadas tradicionales se emplea suero o leche descremada en vez de la cuajada.
Las mezclas que contienen 1 parte de cuajada descremada, 1 a 3 partes de cal hidráulica y 1.5 a 2.5 partes de agua obtuvieron buenos resultados. Aceite de linaza doblemente cocido en pequeñas cantidades (no más de 4 % de la cantidad de la cuajada) incrementan la resistencia, pero hacen que la lechada sea menos trabajable. Esta debe ser muy bien mezclada y debe revolverse algunas veces cada cinco o diez minutos para obtener una emulsión.
Una pintura más fuerte y resistente a la limpieza se obtiene mezclando cal hidráulica, cuajada descremada y barro en proporciones 1:5:5.
En baños y cocinas donde se requiere una mayor resistencia a limpieza en seco y húmedo se recomienda el siguiente procedimiento: 1 parte de cal hidráulica y 5 partes de cuajada descremada mezcladas sin agua durante dos minutos utilizando una mezcladora eléctrica. Esta mezcla puede dejarse reposar por un tiempo y luego sede deben añadir 20 partes de cal hidráulica, 2 a 4% de aceite de linaza doblemente cocido y agua. Dos capas de esta mezcla son suficientes para obtener resistencia a la limpieza en seco y húmedo. Partes de la cal se pueden sustituir por pigmentos de tierra.

Lechada de bórax-caseina
El bórax se puede utilizar en vez de cal hidráulica. Este reacciona químicamente con la caseína de una forma simi-

lar a la cal. Con un contenido alto de bórax se forman cristales que se pueden observar en la lechada. A diferencia de la cal, el bórax no da como resultado un color blanco que es preferible si se desean colores oscuros. Se añade polvo de yeso con el objetivo de espesar la pintura y aclarar el color. Una pequeña adición de polvo de arcilla hace la pintura más trabajable.
Si se emplea polvo de caseína en vez de cuajada descremada, debe dejarse reposar este polvo bajo agua por tres horas para que se expanda (320 g de polvo de caseína en 1 l de agua). Posteriormente se disuelven 65 g de bórax en 1 litro de agua caliente y se añaden a la lechada de caseína. Esta mezcla se rebaja con 12 litros de agua.

Pintura incolora de caseína
Con el objetivo de mantener el color de la superficie de barro y a la misma vez incrementar su resistencia al la limpieza se puede utilizar una pintura con las siguientes proporciones: 1 parte de cuajada descremada con 1.8 a 2 partes de agua y 1/8 a 1/9 partes de polvo de cal hidráulica. Mediante la aplicación de esta pintura se obtiene una superficie incolora a ligeramente lechosa, con un brillo suave sedoso causado por su estructura fina cristalina.

Pintura de sebo-cal
Una receta de Nepal que brinda un acabado exterior espeso, pastoso e impermeable al agua se describe a continua-



12.3-1
Valores s_d de pinturas y valores μ de revoques de barro hidrófobos.

ción: 15 kg de cal viva en polvo junto con 6 kg de sebo (sebo derretido) se vierten en 36 l de agua. Esta mezcla se revuelve cuidadosamente (se debe tomar precaución debido a que la cal reacciona muy intensivamente con el agua pudiendo saltar y quemar la piel). Luego de añadir 6 kg de sal de cocina y revolver cuidadosamente, esta mezcla debe reposar durante 24 horas en una ambiente no muy frío. La capa de agua que se forma en la superficie de la mezcla se decanta.
La mezcla pastosa restante se mezcla posteriormente con 3 kg de arena fina de cuarzo y se aplica en la pared con una brocha en capas de 3 a 5 mm de espesor (Manandhar, 1983). Esta pintura requiere muchas semanas de curado. En Nepal se dice que este revoque dura de 4 a 6 años. Una receta similar se utilizó exitosamente en Australia (Department of Housing, 1981).
Ensayos efectuados con esta mezcla en el Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB) de la Universidad de Kassel, Alemania, mostraron que tiene una buena adherencia con un revoque rugoso y pobre. Pero con una superficie de tierra apisonada hecha de barro arcilloso partes de la pintura se levantan debido a la lluvia y al congelamiento durante varios meses, probablemente esto fue debido a que la adherencia entre la pintura y la superficie era insuficiente

Otras lechadas estabilizadas con cal
Muchos antiguos textos alemanes afirman que además de poderse mezclar la cal con suero, se puede mezclar con orina. Weiss (1963) encontró que utilizando arcilla caolinitica se puede incrementar la resistencia así como añadiendo urea y acetato de amonio. Esta práctica fue muy común en la antigua China donde se producían piezas de porcelana extremadamente delgadas añadiendo orina en estado de putrefacción a la mezcla.
De acuerdo a Jain et al. (1978) la adición de 70 g de cola animal disuelta en 0.5 litros de agua hirviendo y mezclada con 1 kg de cal hidráulica resulto ser adecuada.
En Auroville, India se utilizó exitosamente la siguiente pintura como recubrimiento de cúpulas de bloques de tierra: Se mezclaron las claras de 60 huevos con 2 litros de suero de mantequilla (buttermilk) y 5 litros de licor de palma batido, se mezclo todo esto con 40 litros de cal de conchas y 4 litros de cemento.
Tomando en cuenta varias fuentes la siguientes substancias vegetales añadidas a la cal incrementan también la resistencia al efecto de la limpieza y al clima:
- Cola de harina de centeno (15 l de harina de centeno cocida en 220 l de agua con adición de un poco de sulfato de zinc)
- Savia de Agave
- Jugo de hojas de plátano cocidas
- Savia del cactus *opuntia*
- Savia de *euphorbia lactea*
- Aceite de capoc
- Aceite de linaza natural o doblemente cocido

Pintura de cola de celulosa
Se emplea a menudo cola de celulosa mezclada con polvo de yeso para pintar interiores debido a su bajo costo. Sin embargo no es muy resistente a las inclemencias del tiempo y su resistencia a la limpieza es también baja.

Pintura de bitumen
Las emulsiones bituminosas ofrecen una buena protección para paredes exteriores contra la inclemencias del tiempo. En el Central Building Research Institute (CBRI), Roorkee, India, se ensayó exitosamente la siguiente receta: 1 parte de bitumen 80/100 se calienta en un recipiente con 2 partes de nafta. Esta mezcla se aplica posteriormente con una brocha a una superficie de barro seca. Después que esta capa está seca, se aplica una segunda capa. Con el objetivo de proteger la superficie negra obtenida, es recomendable aplicar una capa final de cal, que se prepara con 70 g de cola animal mezclada con 1 kg de cal hidráulica disuelta en 0.5 l de agua (Jain et al. 1978)

12.3.4 Difusión de vapor

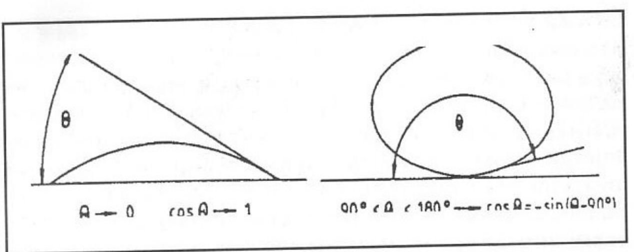
Las pinturas pueden reducir notablemente la difusión de vapor de los muros. Se debe recordar que en los climas fríos el efecto de barrera de vapor de estas pinturas debe ser menor en el exterior que en el interior.
Las propiedades de la difusión de vapor de las pinturas disponibles en el mercado no se mencionan en los envases y por ello la experiencia personal debe ser utilizada al juzgar sus características. Resultados de ensayos con pinturas, recubrimientos, revoques hidrófobos y otros aditivos hidrófobos realizados en el FEB se muestran en la Fig. 12.3-1. Los valores del coeficiente m de la resistencia a la difusión de vapor y la resistencia específica al vapor s_d se pueden ver en la sección 2.4.2.

12.3.5 Penetración de agua

La absorción de agua capilar en superficies de barro (sección 2.3.5) está significativamente influenciada por el recubrimiento. La Tabla 12.1 ofrece algunos coeficientes de absorción de agua capilar (valores w) de revoques de barro con y sin tratamientos.

Tabla 12.1 Valores-w de revoques de barro con diferentes recubrimientos

Pintura	g/m²	kg/m²h^0.5	
Sin pintura	0	9.5	
Aceite de linaza	400	0.0	
Cal-caseina 1:1	420/350	0.6/1.5	0.6hr/6-24 hs
Cal-caseina 1:8	300/300	0.7	
Silin (van Baerle)	700/250/310	0.3	
Hidrofobizante (Herbol)	390/390	0.0	
Baysoline LD (Bayer)	400/290	0.2	
Syltrit (Metroark)	350/320	0.0	
BS 15 (Wacker)	450/430	0.1	
Steinfestiger H (Wacker)	290/290	0.0	



12.4-1 Gota de agua sobre una superficie que ha sido tratada con aditivos hidrófobos (derecha, ángulo mayor a 90°) y sobre una superficie no tratada (izquierda, ángulo menor a 90°)

12.4 Cómo hacer superficies hidrófobas

12.4.1 Aditivos hidrófobos

Existen muchos líquidos incoloros que al utilizarse para impregnar superficies de barro las hacen hidrófobas. La propiedad hidrófoba al agua de una superficie se puede definir por el ángulo que se forma por la tangente del borde de una gota de agua con la superficie (Fig. 12.4-1). Si este ángulo medido como se muestra en la figura es mayor a 90° entonces se denomina esta superficie hidrófoba al agua.
Los agentes hidrófobos al agua penetran en los poros del barro sin sellarlos de tal manera que cuando se reduce



12.4-2Simple spraying test (FEB)

significativamente la absorción de agua capilar la difusión de vapor no se reduce mucho. Los aditivos hidrófobos se disuelven en alcoholes orgánicos, en hidrocarburos o en agua.
Se pueden distinguir los siguientes grupos de aditivos hidrófobos:

- Silane y siloxane
- Polisiloxanes (resinas de silicona)
- Siliconatos
- Resinas acrílicas
- Ester de silicato con aditivos hidrófobos
- Silicatos con aditivos hidrófobos

El silane, los siloxanes y las resinas de silicona reaccionan químicamente con sustancias minerales en el barro y son muy resistentes a las inclemencias del tiempo. Estas reducen la absorción de agua por más de 90%. La difusión del vapor disminuye solo en 5 a 8%.
Los éster de silicato y resinas acrílicas muestran un buen efecto hidrófobo pero reducen la difusión del vapor en un 15 a 30%.
Debido a que los aditivos hidrófobos que se encuentran en el mercado poseen diferentes efectos con diferentes mezclas de barro éstos deben ser ensayados previamente. El coeficiente de absorción de agua w de diferentes revoques de barro que han sido sumergidos en agua dos veces con diferentes aditivos hidrófobos están entre 0.0 y 0.2 $kg/m^2h^{0.5}$ (Tabla 12.1)

12.4.2 Aplicación de aditivos hidrófobos

Los aditivos hidrófobos se aplican como mínimo dos veces en la llamada técnica de "inundación" donde la solución se aplica con rodillos de manera tal que el líquido se escurra y salga hacia afuera cuando el rodillo se pasa por la superficie. La segunda inundación se debe hacer antes de que la primera seque. La superficie de barro debe estar seca y nunca más fría que 8°C ni más caliente que 25°C antes de tratarla. Solamente silanes y siloxanes requieren de una base algo húmeda. Normalmente esta aplicación debe repetirse después de algunos años debido al efecto deteriorante de las inclemencias del tiempo.

12.4.3 Ensayos

En la sección 2.3.7 se explica el ensayo de aspersión para verificar la resistencia de las superficies a una lluvia fuerte. Ver Fig, 2.3-11.

12.5 Revoques de cal

12.5.1 Generalidades

Los revoques de barro utilizados en paredes exteriores (descritos en el capitulo 11) son solo apropiados si no tienen fisuras y si son impermeables. Las superficies expuestas normalmente no deben tener revoques de barro siendo la alternativa más común los revoques de cal. Los revoques de cemento no son apropiados debido a que son muy frágiles. Estos usualmente no resisten cargas térmicas e higro-

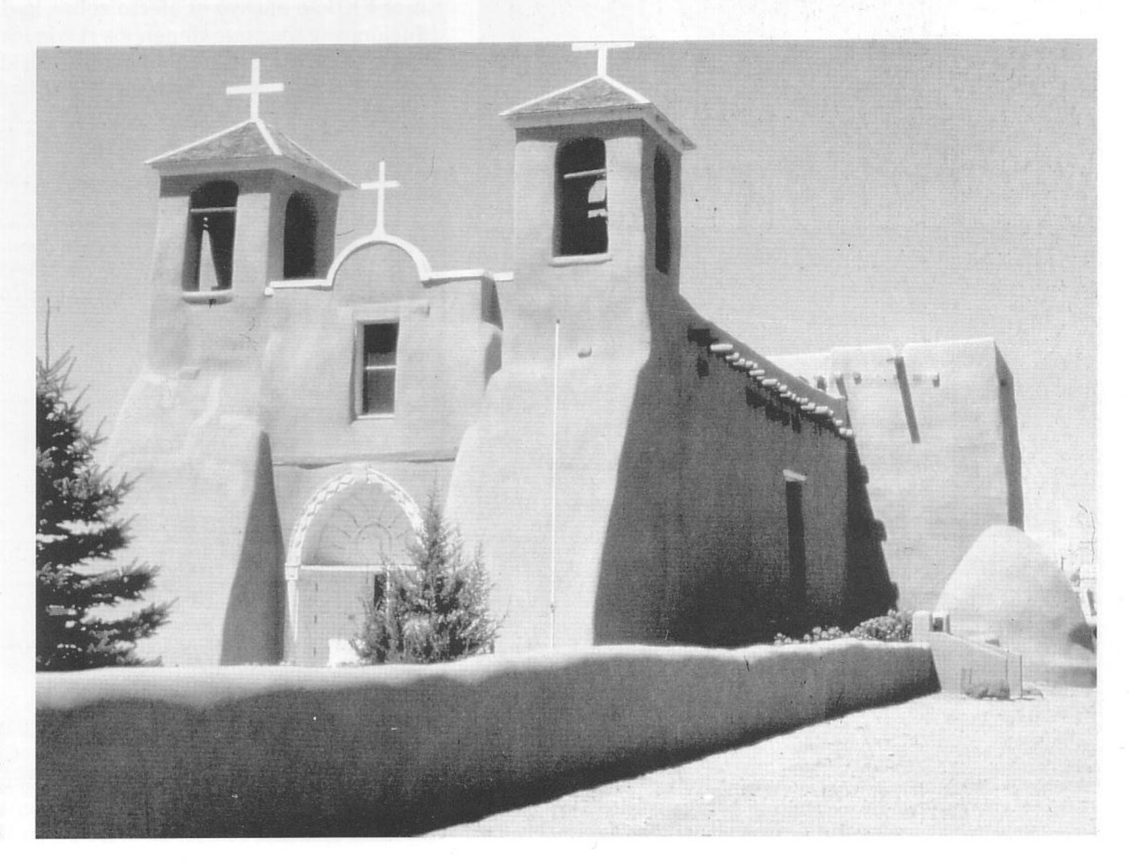
métricas sin fisurarse permitiendo así la penetración de agua en el barro y generando así expansión la misma que a su vez engrandece las fisuras o causa desconchados en el revoque.
En la casa más antigua de tierra apisonada construida en Alemania en 1795 (Fig. 1.2-8) se encontró durante trabajos de reparación en 1992 una erosión masiva por congelamiento que destruyó el barro hasta una profundidad de 20 cm, debido a que el agua penetró a través del revoque de cemento que fue aplicado algunas décadas antes. Un fenómeno similar fue reportado por Bourgeois (1991) Nuevo México, USA. En este caso, la iglesia en Ranchos de Taos (Fig. 12.5-1) construida con adobes en 1815 se revocó con cemento durante una restauración llevada acabo en 1967. Once años después el revoque de cemento debió ser desmantelado debido a que el barro mostraba daños severos provocados por la humedad.
En climas fríos el secado rápido de los muros es necesario si la lluvia penetra desde el exterior u ocurre condensación de vapor desde el interior. Por ello la resistencia al vapor de agua de las capas exteriores debe ser menor que el de las capas interiores.
La Norma Alemana DIN 18550 parte 3 dice que revoques externos hidrófobos deben cumplir las siguientes condiciones:
Coeficiente de absorción de agua $w \leq 0.5 \text{ kg} / \text{m}^2 \,.\, \text{h}^{0.5}$
La resistencia a la difusión específica del vapor debe ser $s_d \leq 2.0$ m y el producto $w \times s_d$ debe ser $\leq 0.2 \text{ kg} / \text{m.h}^{0.5}$.

12.5.2 Preparación de la superficie

Las superficies de barro a revocar deben estar secas y rugosas para permitir una buena adherencia. Las superficies lisas deben ser rociadas con agua para que sus capas exteriores se humedezcan y expandan pudiendo ser rayadas diagonalmente con rayas de 2 a 3 mm de profundidad como se muestra en la Fig. 11.2-2. Mientras que la superficie preparada está húmeda se debe imprimar con una fina capa de lechada de cal que penetre la superficie algunos milímetros. Una mezcla de 0.5 a 1 parte de cuajada descremada, 2 partes de cal hidráulica y 30 partes de agua se ha comprobado adecuada. Si el revoque de cal se expone a cargas térmicas severas o si la superficie a revocar es muy grande o si la adherencia es débil entonces se requieren de mallas metálicas, esteras de caña fijadas a la superficie para aplicar el revoque. Si se utilizan esteras de caña es recomendable embeberlas en una lechada de cal para prevenir la putrefacción.

12.5.3 Reforzamiento

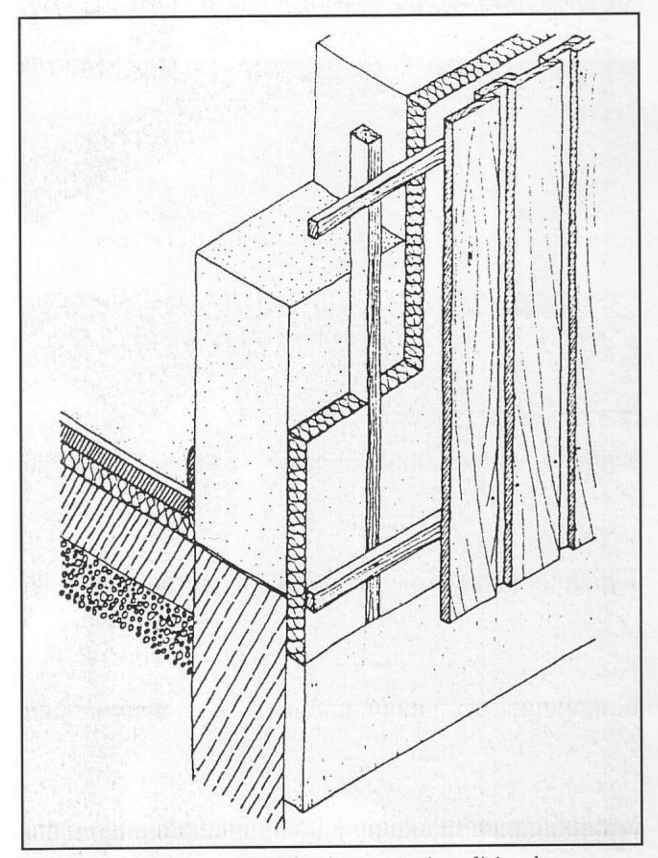
Paneles grandes continuos expuestos a cargas térmicas fuertes necesitan ser reforzados. Para ello se puede utilizar una malla de acero galvanizado con tejido hexagonal (malla de pollo) o mallas similares. Los trabajadores prefieren por lo general mallas de fibras de vidrio debido a que no se corroen y son plegables.



12.5-1
Iglesia de San Francisco de Asís, Ranchos de Taos, Estados Unidos

12.5.4 Composición

El revoque normal de cal usualmente consiste en 1 parte de cal hidráulica y 3 a 4 partes de arena. Debido a que esta mezcla es comúnmente utilizada en la construcción en todo el mundo no se profundizará sobre ella en este libro. Sin embargo los revoques de cal-caseína no son tan comunes y por ello se describen a continuación.
Antiguas recetas prescriben que el pelo animal y la caseína mejoran el comportamiento de los revoques.
Antiguamente la caseína se añadía en forma de suero o suero de mantequilla (buttermilk). La caseína y la cal reaccionan químicamente para formar albuminato de calcio, un componente resistente al lavado. La adición de caseína reduce la absorción de agua de un revoque de cal pero a la misma vez dificulta la difusión de vapor.
En el FEB se ensayó exitosamente un revoque de cal-caseína para exteriores. La mezcla consiste en cuajada descremada, cal hidráulica y arena en una proporción 1:10:40. Primero la cal debe ser muy bien mezclada con la cuajada descremada formando una pasta cremosa sin adición de agua. Luego de dejar reposar la mezcla por un tiempo se deben añadir el agua y la arena. Para obtener una mezcla más líquida a ser utilizada para un acabado final aplicado con brocha, una mezcla más líquida debe ser adecuada con una proporción 1:6:25 con los mismos ingredientes respectivamente. En climas cálidos se puede añadir algo de sal de cocina para mantener el revoque húmedo durante un lapso mayor y así optimizar el curado.



12.6-1 Muro de barro con aislamiento exterior adicional y tablones de madera que forman una cámara de aire

12.5.5 Aplicación

Antes de aplicar el revoque la superficie de barro debe humedecerse e imprimarse con una lechada de cal-caseína. Luego se aplica el revoque en dos capas hasta que el espesor total alcance un máximo de 20 mm. En la primera capa se puede añadir un poco de cemento para acelerar el curado. La segunda capa se debe aplicar mientras la anterior está ligeramente húmeda. Cuando aparecen las fisuras de retracción estas se pueden humedecer con una brocha embebida en la lechada de cal y luego se sellan frotando con un badilejo. Se debe tomar en cuenta que los revoques de cal fraguan solo en contacto con el dióxido de carbono del aire y este proceso sólo es posible en presencia de suficiente humedad. Por ello las paredes deben estar protegidas del asoleamiento directo y el viento y/o mantenerse húmedas con una tela húmeda.
Los revoques interiores se pueden aplicar en una sola capa. El revoque de yeso o de cal y yeso con o sin caseína pueden utilizarse también en trabajos de interiores. No es recomendable aplicar revoques de cemento en interiores.

12.5.6 Efecto sobre la difusión de vapor

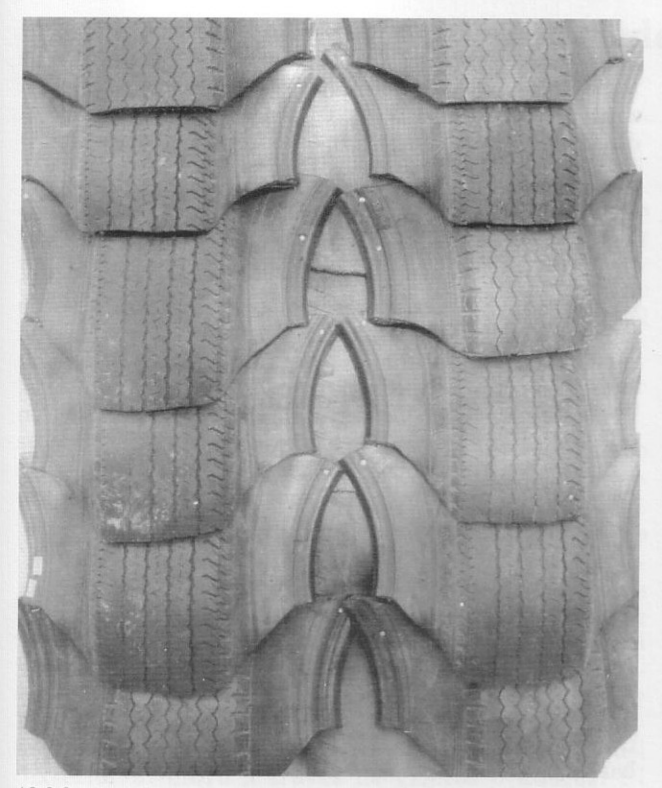
En el FEB se ensayó el efecto sobre la disminución de la difusión de vapor que tienen los revoques de cal cuando se añade aceite de linaza doblemente cocido y caseína. Los valores del coeficiente de resistencia de difusión de vapor obtenidos están listados en la tabla 12.2.

Tabla 12.2 Valores μ de revoques de cal (los valores están expresados en volumen)

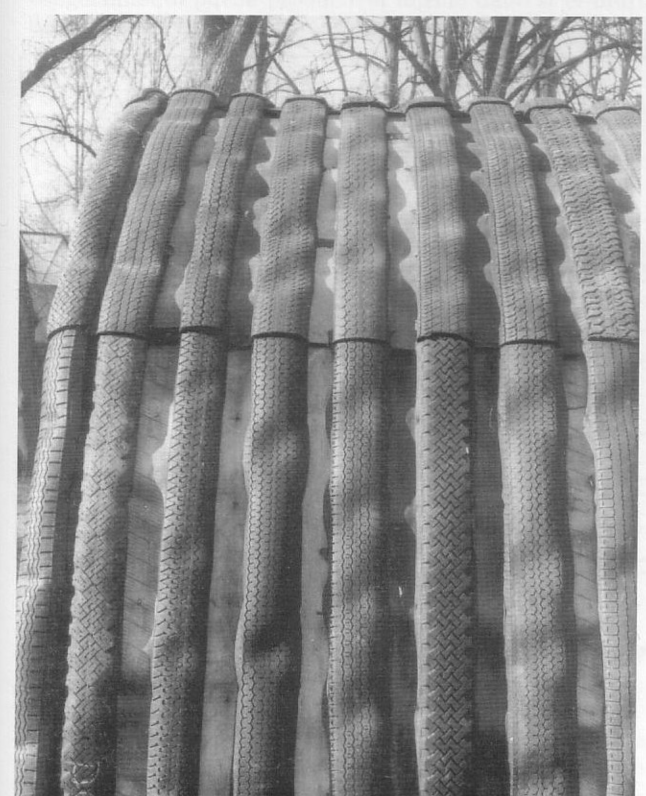
Cal	Cal Trass	Arena	Cuajada descremada	Aceite de linaza	Barro arcilloso	Estiércol	Valor μ
1	-	3	-	-	-	-	11.2
-	1	3	-	-	-	-	10.8
1	-	6	0.5	-	-	-	6.2
1	-	15	0.5	-	3	-	9.7
1	-	3	-	0.05	-	-	15.2
1	-	3	0.25	0.05	-	-	28.5
1.5	-	10	-	-	2	6	8.0

12.6 Ripias, tablazones y otros cubiertas

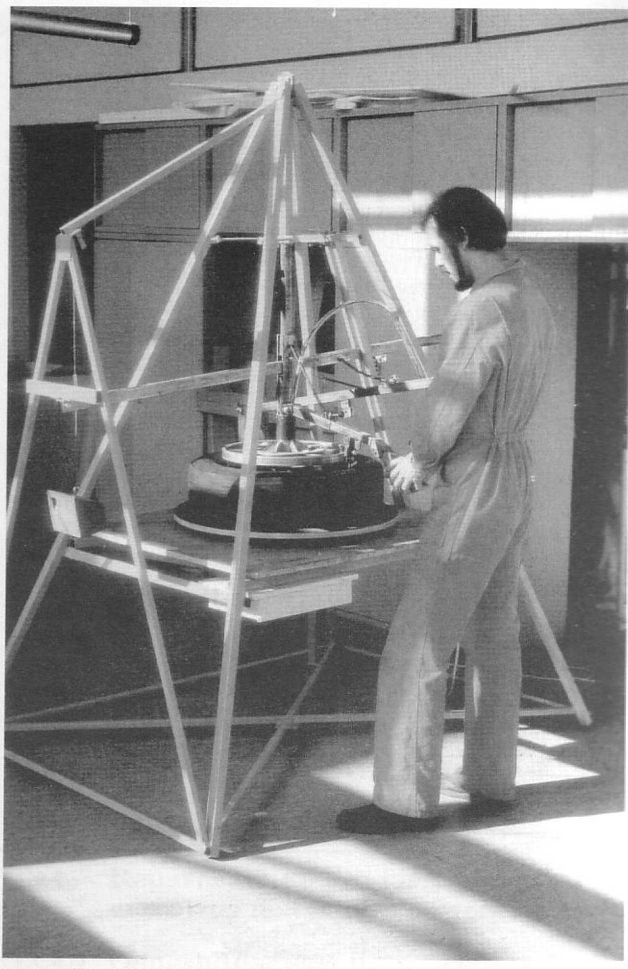
Además de revoques y recubrimientos, ripias, tablazones, paneles grandes o muros de ladrillos separados por una cámara de aire pueden utilizarse para proteger los muros de barro. Estos métodos son especialmente útiles si se requiere aplicar desde el exterior un aislamiento térmico adicional. Una solución común se muestra en la Fig. 12.6-1.



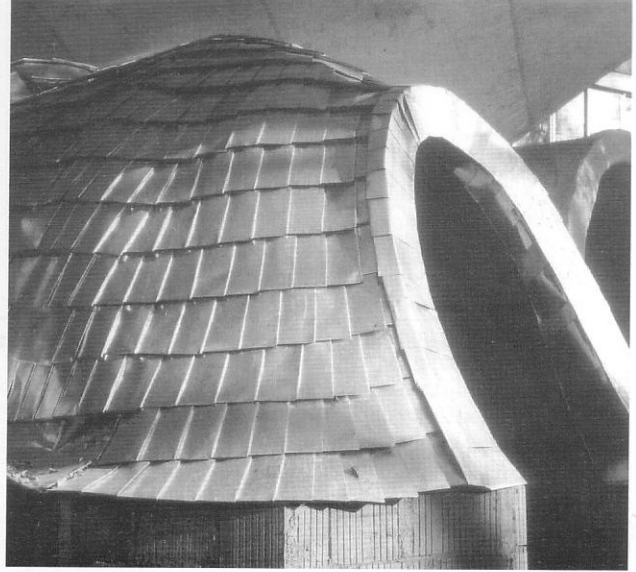
12.6-2



12.6-2, 12.6-3 Ripias hechas de neumáticos desechados



12.6-4 Equipo para cortar neumáticos desechados de autos, FEB, Universidad de Kassel



12.6-5 Cúpula de bloques de tierra cubierta con ripias hechas de planchas desechadas de offset, FEB, Universidad de Kassel

Las Figs. 12.6-2 y 12.6-3 muestran dos métodos desarrollados en el FEB que utilizan neumáticos desechados de autos, cortados en forma de ripias. Estos se pueden fijar directamente en el muro de barro o sobre una subestructura de madera La Fig. 12.6-4 muestra el equipo desarrollado para cortar estos neumáticos en tres partes. El neumático se fija sobre un disco rotatorio y un cuchillo presiona el mismo de tal manera que la huella se separe de los lados. Las huellas abiertas pueden ser utilizadas como elementos largos que se pueden traslapar para techar una bóveda como se muestra en la Fig. 12.6-3. La Fig.12.6-5 muestra una cúpula de barro cubierta por ripias hechas de planchas de aluminio que fueron utilizadas para impresión en offset.
En Mesopotamia hace miles de años se techaban muros de adobe con una capa de ladrillos cocidos vidriados. Es aconsejable separar este tipo de recubrimiento del muro con una cámara de aire de tal manera que la lluvia que penetre pueda drenarse y no dañe el muro.

12.7 Métodos estructurales

12.7.1 Protección contra la lluvia

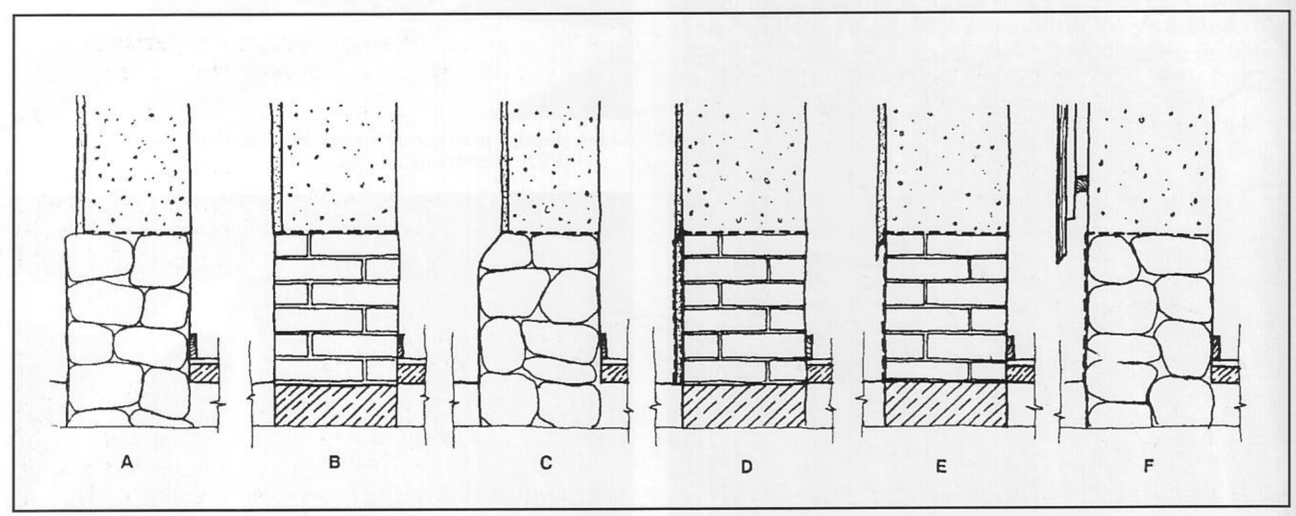
Un método para prevenir que la lluvia llegue a tener contacto con el muro de barro es hacer un alero. Un método para prevenir el salpicado de la lluvia es hacer un zócalo suficientemente alto (30 a 50 cm). La junta entre el muro y el zócalo debe ser cuidadosamente diseñada de tal manera que el agua de lluvia pueda escurrirse sin problemas y no penetre en esta junta. En la Fig. 12.7-1 la solución A es inaceptable. Las soluciones B y C pueden ser aceptables en zonas de poca lluvia. Las soluciones D, E y F muestran diseños perfectos para evitar este problema.

12.7.2 Protección contra la humedad ascendente

Los muros exteriores de barro deben protegerse de la humedad ascendente de la misma manera que los muros de ladrillo cocido o los de piedra. Para esto se emplea una capa impermeable, usualmente cartón asfáltico (fieltro bituminoso) y otras veces planchas metálicas o plásticas. Debido a que estos tienen un costo elevado en los países en vías de desarrollo se emplea como alternativa una capa de 3 a 4 cm de espesor de hormigón rico en cemento. Este debe impregnarse con asfalto (bitumen) o aceite de automóvil usado.

12.7.3 Protección contra la inundación

En baños y cocinas el zócalo debe tener revestimiento impermeable que puede ser de tejas, de piezas para zócalos, o un revoque rico en cemento. El diseño del revestimiento debe ser tal que el agua de roturas en tuberías e inundaciones de piso no llegue a tener contacto con el muro de barro.



12.7-1 Diseño de zócalos realizados correctamente e incorrectamente

13. Reparación de elementos de barro

13.1 Generalidades

La reparación de partes dañadas de barro, especialmente las grietas y juntas grandes, demandan medidas especiales diferentes a aquellas utilizadas para mampostería convencional y para revoques de cal. Los problemas específicos de la reparación de elementos de barro y el incremento del aislamiento térmico se describen en este capítulo.

13.2 Daños en construcciones de barro

Los daños en elementos de barro pueden aparecer debido a diferentes retracciones en el secado y a la expansión térmica, así como por efecto del agua y por efectos mecánicos. Si un revoque se contrae durante el proceso de secado, o no tiene adherencia con la superficie, entonces puede suceder que se desprenda de la pared. Estas partes débiles pueden ser localizadas fácilmente golpeando el revoque con los puños. Si una gran cantidad de agua se condensa en un muro, entonces el barro se expande desconchando el revoque o la pintura. Este daño también puede ocurrir si hay condensación de grandes cantidades de agua en la superficie exterior de un muro de barro o si se infiltra agua del exterior al muro a través de grietas o huecos. El congelamiento puede producir el mismo daño si el muro está húmedo y el agua congelada se expande.

13.3 Reparación de grietas y juntas con rellenos de barro

13.3.1 Generalidades

Las grietas y juntas en elementos de barro secos no pueden ser reparadas con barro plástico, debido a que este no se adhiere a una superficie de barro seca. Cuando el relleno seca se separa de la superficie y cae. Por ello, es importante tratar previamente la junta con agua y utilizar una mezcla que tenga una pequeña retracción previa si es posible.

13.3.2 Mezclas

Para establecer la composición de la mezcla para el relleno.
Se deben tomar en cuenta las siguientes características:

- El relleno debe tener suficiente cohesión para tener adherencia con la superficie húmeda de las grietas y juntas.
- La mezcla debe contener suficiente arena gruesa u otras partículas gruesas que minimicen la retracción. Fibras o pelos pueden también ser utilizados.
- Con el objetivo de disminuir el tiempo de fraguado, se puede añadir yeso, cal o cemento. Las desventajas de añadir dichos aditivos es que la cohesión y la resistencia se reducen.

Juntas y grietas en elementos de interiores pueden ser rellenados con una mezcla de 1 parte de barro, 0.5 a 1 de cal hidráulica y 0.5 a 1 de yeso.
En juntas expuestas a las inclemencias del tiempo no se debe utilizar yeso pero se puede añadir al barro cemento, cal altamente hidráulica, o una mezcla de ambos en un porcentaje de 8 a 20 %. En vez de estos aditivos se puede añadir 4 a 7 % de aceite de linaza doblemente cocido. Este relleno se mantiene plástico por varias semanas.

13.3.3 Aplicación de rellenos

Para obtener una buena adherencia entre el relleno y la superficie a reparar es necesario agrandar las grietas hasta 1 cm de espesor, extraer las partículas sueltas y humedecer los bordes de las juntas hasta que el barro se expanda y la superficie este plástica. Cuando se emplea barro con aceite de linaza doblemente cocido como relleno, la superficie debe tratarse previamente con aceite de linaza.
Primero se aplica el relleno plástico en los bordes de la junta con un cuchillo, después se rellena la junta con una mezcla más seca, introduciéndola mediante golpes de martillo (Fig. 8.4-14). Es recomendable que la junta sea rellanada con más material que el necesario para que cuando seque y se contraiga pueda ser compactada de nuevo mientras este todavía ligeramente húmeda.

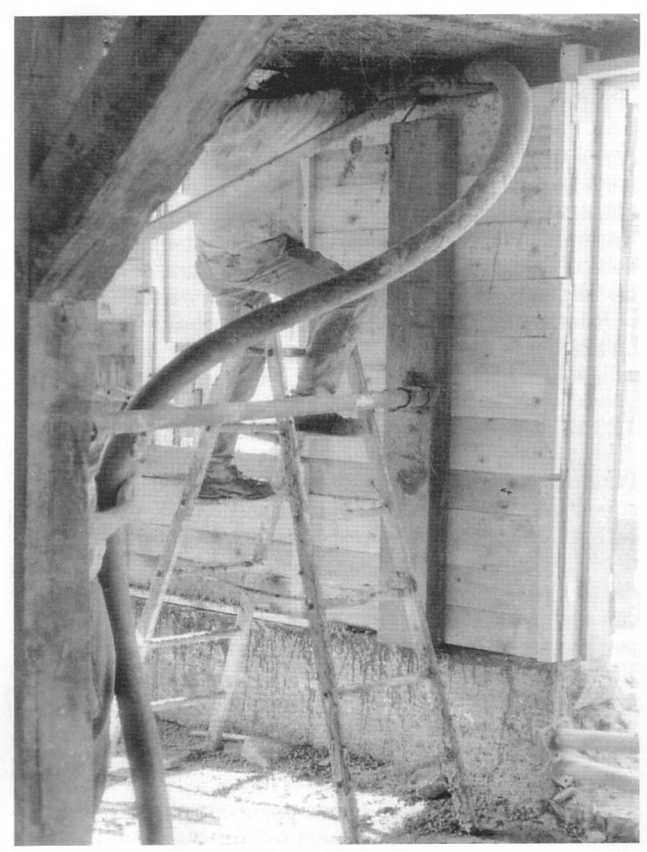
13.4 Reparación de grietas y juntas con otros materiales de relleno

13.4.1 Generalidades

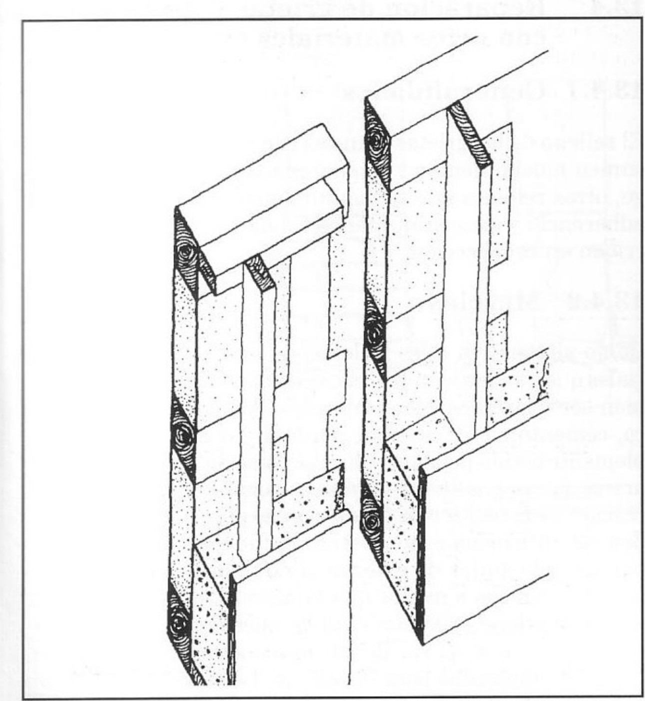
El relleno de las grietas y juntas con rellenos de barro consumen mucho tiempo y requieren experiencia. Sin embargo, otros rellenos que tienen una menor retracción, mejor adherencia y necesitan menos tiempo y habilidad se describen en esta sección.

13.4.2 Mezclas

Como alternativa a los rellenos de barro, todos los materiales que pueden ser utilizados como revoques pueden también ser utilizados como rellenos. Cal altamente hidráulica, cemento, yeso, caseina, celulosa y aceite de linaza doblemente cocido pueden utilizarse como aglutinantes. Limo, arena, grava y aditivos orgánicos como el corcho, aserrín, cáscara de cereales o de arroz y papel periódico picado pueden ser utilizados como materiales de relleno. Para la reparación de juntas de exteriores no se deben emplear materias orgánicas a menos que la mezcla tenga un pH alto, lo que previene el crecimiento de micro organismos. Mezclas sintéticas elásticas de silicona o acrílico pueden también ser empleadas para el relleno. La silicona se adhiere al barro si la superficie de la junta está seca y libre de partículas sueltas.



13.6-1 Bombeo de barro mineral alivianado



13.6-2 Capa adicional de aislamiento térmico interior de barro alivianado con mineral en un muro de entramado *«Fachwerk»*

13.5 Reparación de daños de mayor magnitud

13.5.1 Reparación con barro

Superficies grandes erosionadas o con desprendimientos se deben reparar quitando todas las partículas sueltas y humedeciendo la superficie antes de aplicar el barro de reparación, como se describe en el capitulo 11 sobre revoques de barro.

Con el objetivo de reducir la retracción cada capa de revoque de barro no debe tener un espesor mayor a 1 a 1,5 cm. Si el daño tiene una profundidad mayor a 2 cm de espesor, es recomendable raspar el área a una profundidad de 4 a 6 cm. La superficie se puede rellenar posteriormente con adobes rotos y mortero. En áreas propensas a las heladas no se deben utilizar ladrillos crudos ya que no son resistentes al congelamiento.

13.5.2 Pinturas

Si se debe reparar la pintura de una superficie de barro, primero se debe quitar la pintura anterior. Se debe imprimar la superficie con una lechada de cal caseina, como se describe en la sección 12.3.2. Si la superficie es muy arenosa y lisa es mejor emplear una lechada de goma de cal-caseina. Esta se prepara con cal hidráulica y cuajada descremada mezclada intensamente sin agua por dos minutos en proporciones 1:5. La mezcla se deja reposar y luego se rebaja con agua en proporciones 1:5. Esta cola debe ser utilizada máximo en una hora (Lezner y Stein, 1987, p. 145)

13.6 Mejoramiento posterior del aislamiento térmico con barro alivianado

13.6.1 Generalidades

En esta sección se describen aspectos físicos y estructurales para el mejoramiento posterior del aislamiento térmico con barro alivianado en muros exteriores existentes. Diferentes tipos de agregados apropiados se describieron en la sección 4.7. La utilización del barro alivianado como relleno de estructuras de madera se describió en la sección 4.10 y diseños de muros de tierra altamente aislantes en la sección 14.2.1.

13.6.2 Condensación

Durante las últimas décadas del siglo XX han ocurrido muchos daños en las edificaciones históricas de entramado *«Fachwerk»* en Alemania. La mayoría ocurren debido a la condensación en los muros, problema que no ocurría antes.

Hoy en día se produce mucha más humedad en las cocinas y baños que antiguamente. En aquella época los baños se hacían con agua fría en una tina en cambio hoy una ducha diaria caliente es común. El lavado de la ropa se hacia en el exterior al aire libre y el secado también,

en cambio hoy el lavado y secado de la ropa se hace en el interior de la vivienda. Todos esos factores contribuyen a la producción de mucha más humedad en las viviendas. También las temperaturas interiores son mayores en comparación al pasado. Sin embargo la humedad relativa en el interior es más o menos la misma y la humedad absoluta es significativamente más alta. Las puertas y ventanas en estas viviendas de entramado están ahora mejor aisladas, lo que conduce a un intercambio de aire menor. Todos estos factores provocan una mayor condensación en los muros. Por ello es imperativo que las características de la difusión del vapor de los muros sean cuidadosamente controladas.

13.6.3 Aislamiento térmico

Los muros exteriores de las viviendas típicas de entramado tienen un espesor de 14 a 20 cm. El relleno del entramado es de ladrillos crudos, adobes o de trenzados de paja y barro. El coeficiente de transmisión de calor U de estos rellenos es de 2,0 a 2,7 W/m²K. Tomando en cuenta el entramado de madera se obtiene un valor U de 1,2 a 2,2 W/m²K. Esto significa que la transmisión de calor a través de estos muros es de 3 a 6 veces mayor que la deseada por las normas modernas en zonas con climas templados o fríos.
La solución más sencilla y adecuada desde el punto de vista físico para incrementar el aislamiento térmico de estos muros es hacerlo en el exterior. Si la vivienda es patrimonio y no se debe cubrir la fachada desde el exterior, el aislamiento térmico debe aplicarse en el interior. Esto generalmente provoca problemas ya que en la práctica no se pueden evitar puentes de calor y vapor. Lo que puede conllevar a un humedecimiento parcial del muro debido a la condensación, y a subsiguientes daños en la superficie del muro. Asimismo el incremento de la perdida de calor conduce a la formación de moho.

13.6.4 Revestimiento de barro alivianado como aislamiento interior

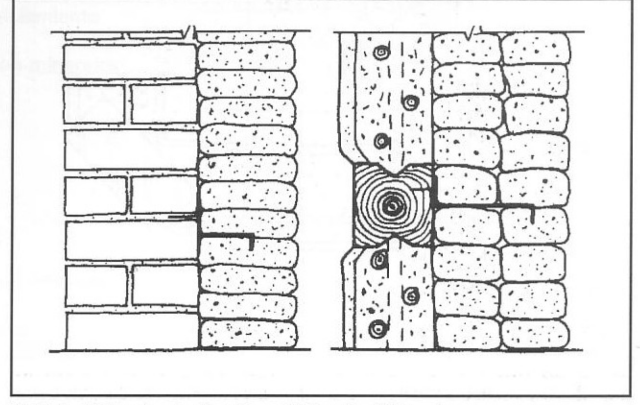
Una posibilidad para aplicar aislamiento térmico interior adicional se muestra en la Fig. 13.6-2. En ella, un molde se fija con travesaños montados sobre un muro histórico y se bombea una capa de barro alivianado con mineral. Es importante que no quede espacio entre las dos capas para no interrumpir el transporte de agua capilar y vapor.
En el proyecto que se muestra en la Fig. 13.6-1, 5 personas tomaron 8 horas para completar 60 m² del muro empleando el método descrito en el capitulo 10 para aplicar una capa de 15 a 25 cm de espesor de barro alivianado. La figura 13.6-3 muestra la superficie de ese muro luego de quitar el molde. Esta relativa alta densidad se tomo para obtener suficiente aislamiento contra el ruido, almacenamiento de calor y efectos de balance de humedad. El mismo método puede ser utilizado para un aislamiento térmico exterior, para ello se recomienda una mezcla de barro de menor densidad.



13.6-3 Superficie de un muro de barro alivianado con mineral con una densidad de 1000 kg/m³ luego de quitar el molde

13.6.5 Elementos prefabricados

Un método aún más simple para aislamientos térmicos interiores es utilizar elementos prefabricados de barro como ser bloques o paneles como se describe en la capitulo 7, o utilizar mangueras rellenas con barro alivianado como se describe en la sección 10.7. Se pueden colocar sin molde en estado plástico contra el muro en una o dos capas como se muestra en la Fig. 13.6-4. En este caso es preferible montarlas y fijarlas al muro existente con alambres de acero. (4 ganchos por metro cuadrado).



13.6-4 Aislamiento térmico adicional utilizando mangueras rellenas de barro alivianado con mineral

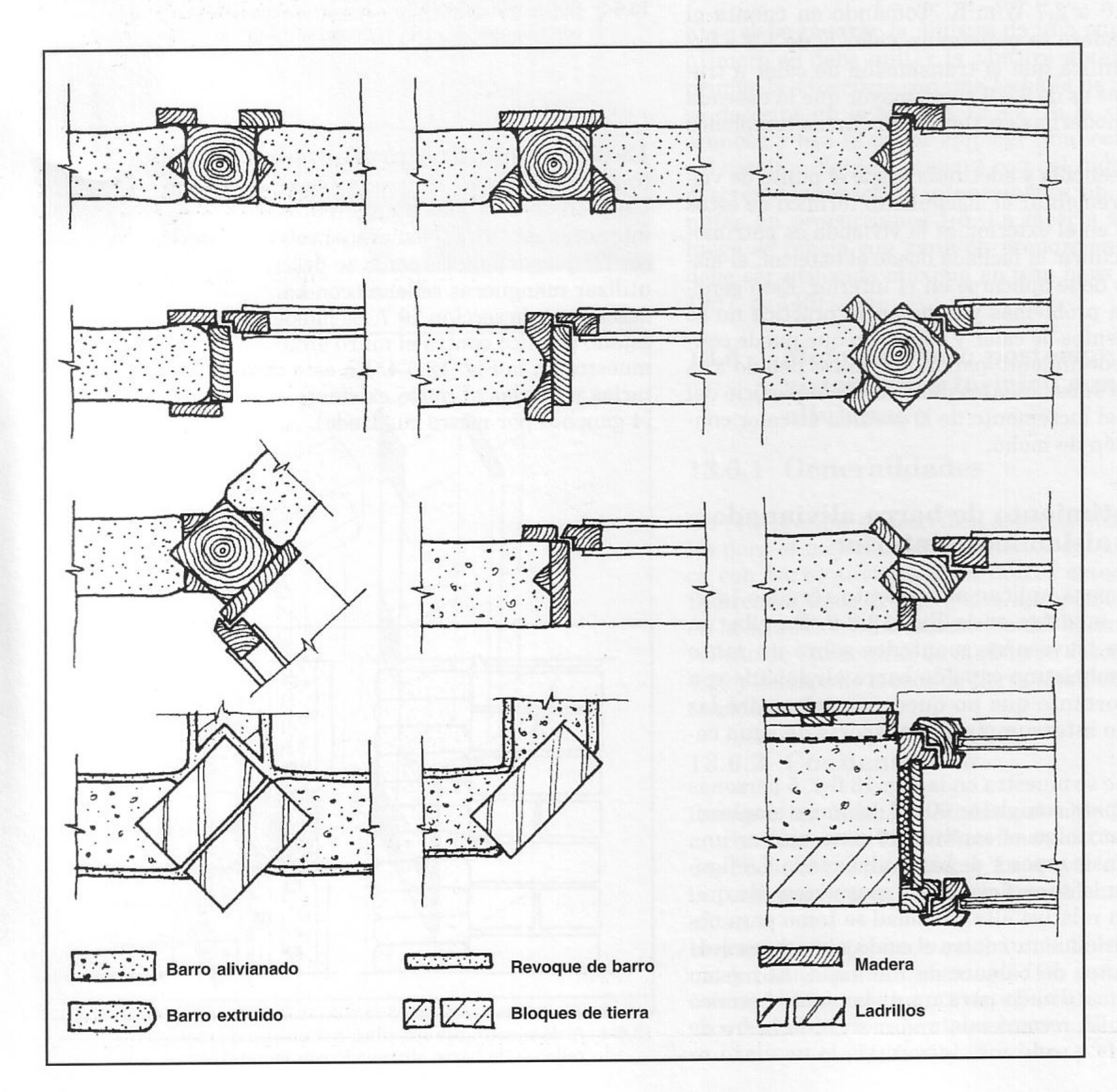
14. Diseño de elementos constructivos especiales

14.1 Juntas

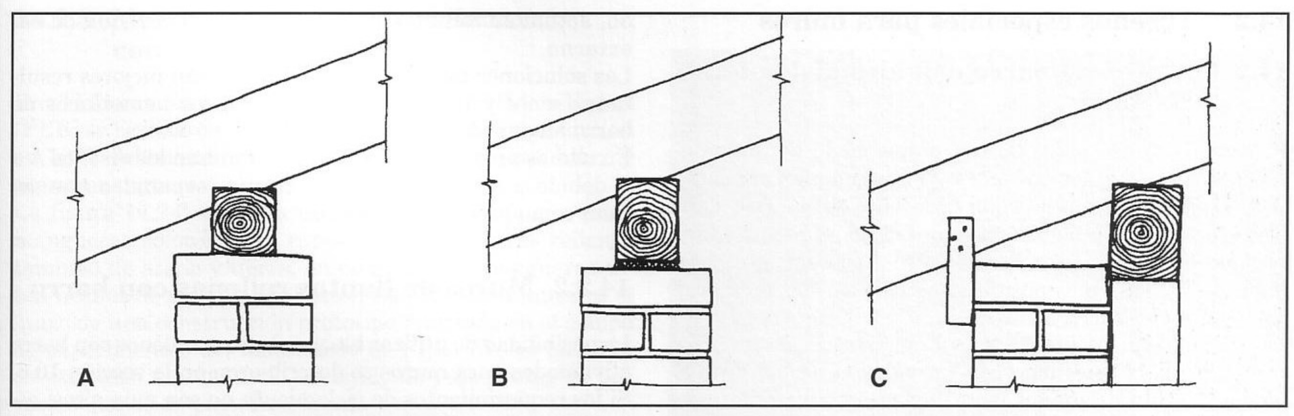
Cuando los elementos de barro se unen a columnas, vigas, ventanas o marcos de puertas se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- En las técnicas de barro húmedo se forma una hendidura en la junta debido a la retracción del barro.
- Cuando se utilizan rellenos de barro entre elementos de madera y después que secan puede aparecer una hendidura debidas a la contracción de la madera durante su secado, proceso que puede durar más de dos años (hasta que la madera alcanza su equilibrio en el contenido de humedad).
- La estructura de madera continua expandiéndose y contrayéndose ligeramente durante toda su vida debido a la absorción y desorción de humedad.

La Fig. 14.1-1 muestra algunos diseños de juntas para *barro extruido,* mangueras rellenas con barro, adobe y barro alivianado como relleno entre columnas de madera, mampostería o marcos de puertas y ventanas de madera.
Los cabios (tijeras) de una cubierta no deben descansar directamente sobre el muro de tierra; sino sobre una viga o una plancha de madera como se muestra en la Fig. 14.1-2 A. Si los tirantes descansan sobre una estructura de columna y viga y si el muro no es portante entonces la retracción de la estructura de madera debe tomarse en cuenta.
En la Fig.14.1-2 B, se introduce una junta elástica entre la viga y el muro con el objetivo de proveer suficiente tolerancia a la contracción; mientras que en la Fig.14.1-2 C el sistema estructural se separa del muro, permitiendo así un mejor movimiento vertical de la estructura de madera.



14.1-1



14.1-2 Secciones verticales de estructuras de cubierta y muros portantes y no portantes.

A

Tableros de madera
Protección contra le viento
Aislamiento térmico (λ= 0.04)
Bloques de barro como relleno de estructura de madera

B

C

Aislamiento térmico (λ= 0.04)
Barro alivianado con minerales como relleno de estructura de madera
(λ= 0.21)

D

E

Aislamiento térmico (λ= 0.04)
Muro portante de tierra
(λ = 0.7) (λ = 0.9)

F

G

Revoque de cal
Corcho (λ= 0.05) Aislamiento térmico (λ=0.04)
Barro alivianado con minerales
(λ= 0.21)

H

J

Revoque de cal
Barro alivianado con minerales
(λ= 0.18)
Estructura de madera
Revoque de barro alivianado

K

14.2-1 Secciones horizontales de varios muros de barro con valor U de 0.3 W/m²K.

14.2 Diseños especiales para muros

14.2.1 Muros de barro con alto aislamiento térmico

El valor U de un muro de barro apisonado de 30 cm de espesor (sin agregado liviano) es aproximadamente de 1,3 W/m^{2}K. Para alcanzar un valor U de 0,5 W/m^{2}K en ese muro el mismo debería tener un espesor de 1,65 m. Esto demuestra que en climas fríos donde se requiere un alto aislamiento térmico no es posible construir un muro exterior solamente con barro.
Los ejemplos en la Fig. 14.2-1 no muestran solo un aislamiento térmico adecuado con un valor U de 0.3 W/m^{2}K, sino que están diseñados para tener una suficiente masa térmica para balancear la temperatura interior, suficiente barro para equilibrar la humedad del aire interior, así como suficiente aislamiento contra el ruido.
Los diseños E y F son para muros portantes, a diferencia de los otros. Los paneles de aislamiento térmico exteriores que se muestran en G y H se pueden utilizar como encofrados perdidos para verter el barro alivianado, actuando también como base para el revoque de cal externo.
Las soluciones más simples y que obtienen mejores resultados son J y K que consisten en muros monolíticos de barro alivianado de baja densidad.
En climas propensos a la lluvia se prefieren los diseños A a F debido a que tienen capas externas separadas que actúan como protección al clima.

14.2.2 Muros de llantas rellenas con barro

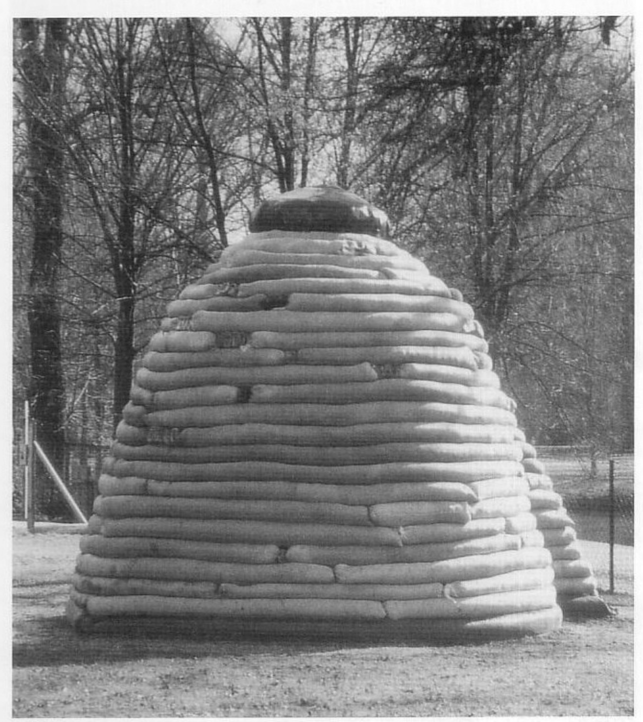
La posibilidad de utilizar bloques huecos rellenos con barro alivianados para muros se describieron en la sección 10.6. Si los requerimientos de aislamiento no son muy altos, estos se pueden rellenar con suelo arcilloso puro. Michael E. Reynolds ha construido varias residencias en Nuevo México, Estados Unidos, con muros hechos de llantas usadas de autos, rellenas con suelo excavado de los cimientos. Solo la parte superior de las llantas se rellenó con concreto para fijar un anillo de madera como anclaje. La superficie interior se cubrió con malla de metal expandido y luego se revocó.



14.2-2 Muro de llantas usadas rellenas con tierra, Estados Unidos

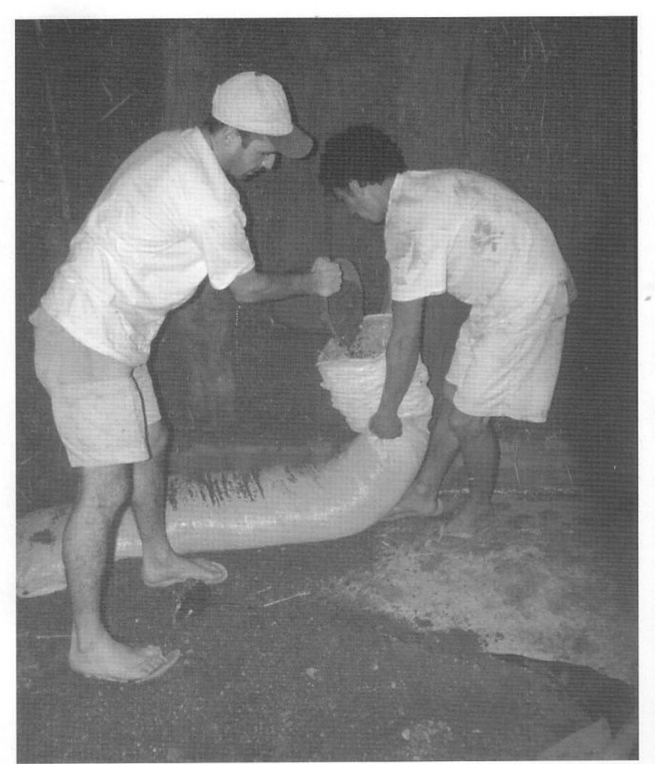
14.2.3 Muros de mangueras rellenas con barro

En el laboratorio experimental de la universidad de Kassel (FEB) se realizaron distintas experiencias de construcción en 1977 .rellenando un tubo de tejido elástico con barro y arena (mangueras)
La figura 14.2-3 muestra una cúpula realizada con estas mangueras colocadas en capas unas sobre otras rellenas también de arena y tierra, en este caso las mangueras están hechas de un tejido poliéster. La Fig.14.2-4 muestra el muro de una construcción prototipo realizada en el campo de experimentos del laboratorio de FEB- Kassel en 1978 en este caso fue utilizado un tejido de yute protegido por varias manos de pintura a la cal.
Otra aplicación de este sistema fue realizada en Guatemala en 1978 para la construcción de una vivienda antisísmica ver capítulo 15.5.
El Arq. Nader Khalili continuó desarrollando esta idea en los años 80 utilizando sacos de harina o azúcar rellenados de tierra y apisonados en el lugar antes de la colocación de la próxima hilera.
Esta técnica se expandió en toda América y se conoce con el nombre de superadobes.
La Fig. 14.2-5 muestra el llenado de los sacos con un balde y la Fig. 14.2-6 el apisonado del mismo.
Las Figs. 14.2-7 y 14.2-8 muestran un proyecto en construcción, Brasil.

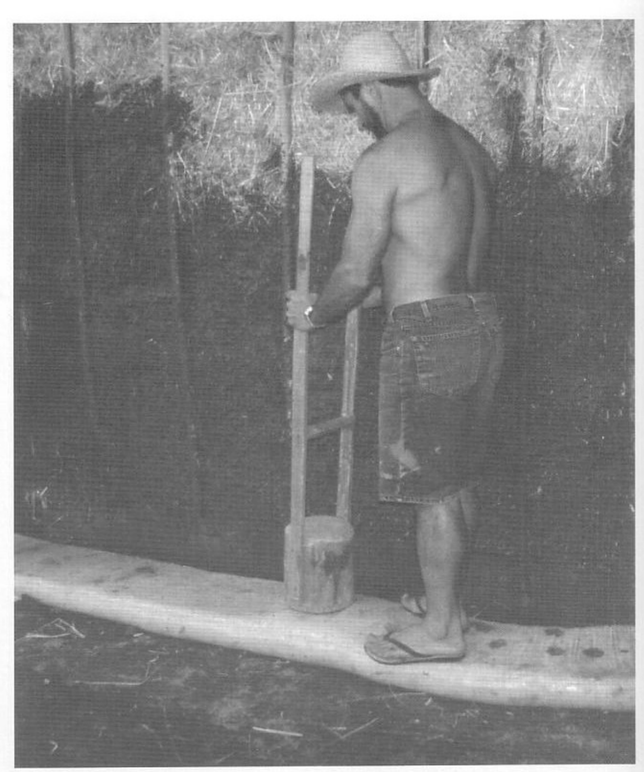


14.2-3

14.2-4



14.2-5



14.2-6

14.2-7

14.3 Entrepisos de barro

14.3.1 Entrepisos tradicionales de barro

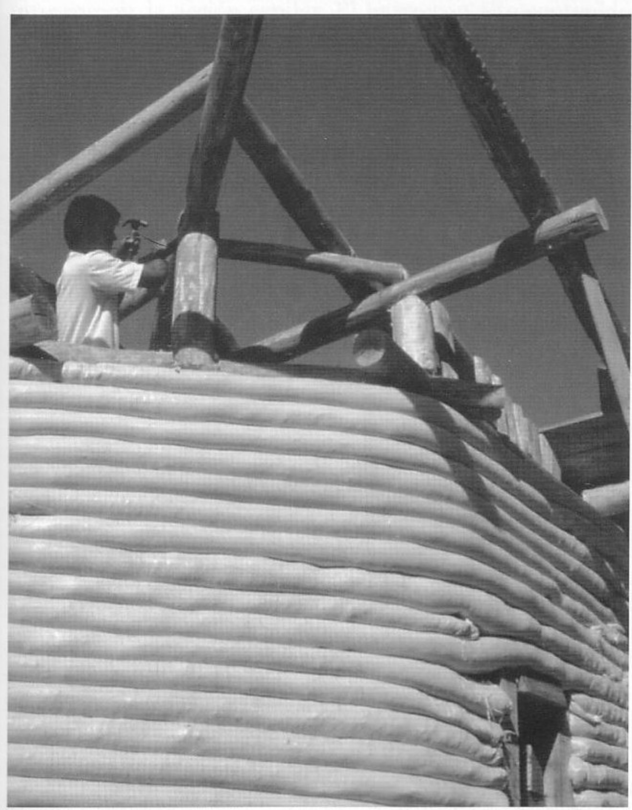
En las casas tradicionales de entramado de madera *(Fachwerk)* en Alemania los entrepisos se hacen utilizando barro para aumentar la resistencia al fuego, el aislamiento al ruido y algunas veces el aislamiento térmico. Las técnicas tradicionales que se describen aquí requieren de mucho trabajo y por ello no se emplean en los países industrializados al menos que los códigos de patrimonio histórico así lo exijan.

• *Entrepisos de barro apisonado*

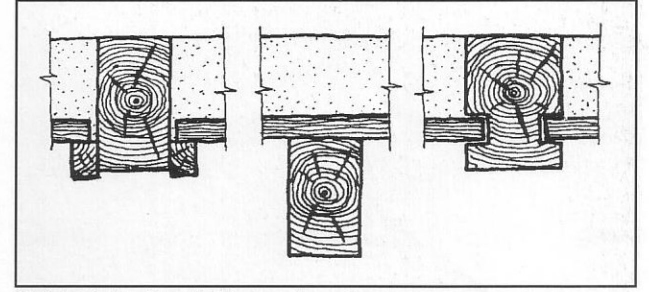
La Fig. 14.3-1 muestra tres vías diferentes de utilizar la tierra apisonada como relleno entre o sobre vigas de madera. El entrepiso se forma de tablas de madera vistas sobre las que se compacta la tierra húmeda. Una capa de paja se utilizaba sobre las tablas para prevenir la caída del barro a través de los huecos. En la actualidad se emplea papel graso o lámina de poliéster con el mismo propósito.

• *Entrepisos de "spalier"*

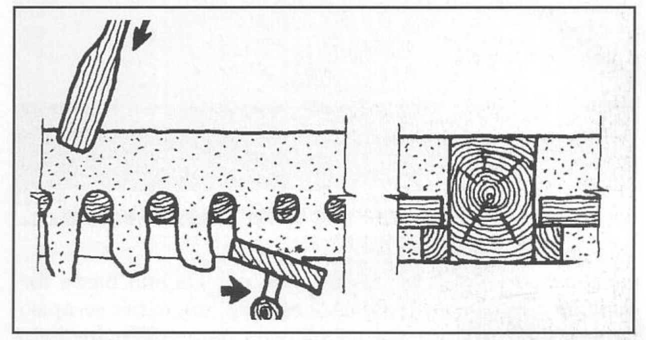
La Fig. 14.3-2 muestra un entrepiso tradicional alemán denominado *spalier*, en el que se colocan listones de madera a una distancia de 3 a 6 cm entre las vigas del piso. Se



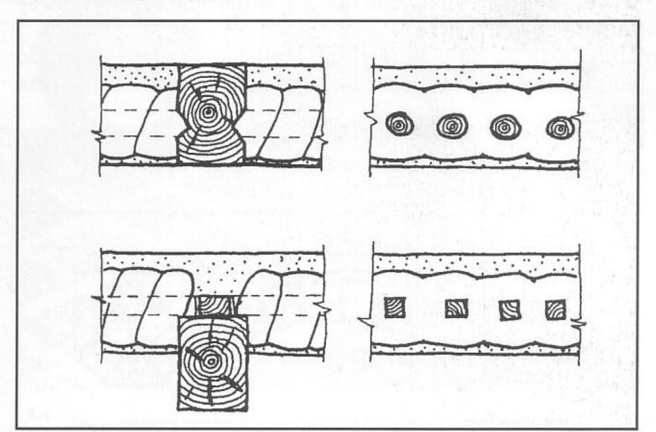
14.2-8



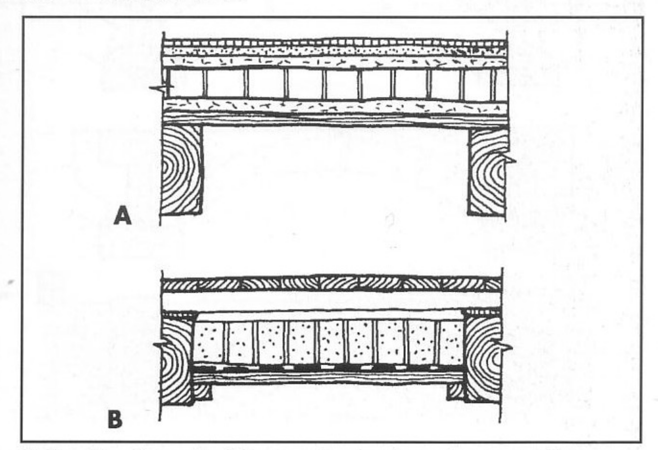
14.3-1 Entrepisos de tierra apisonada



14.3-2 Entrepiso *spalier*



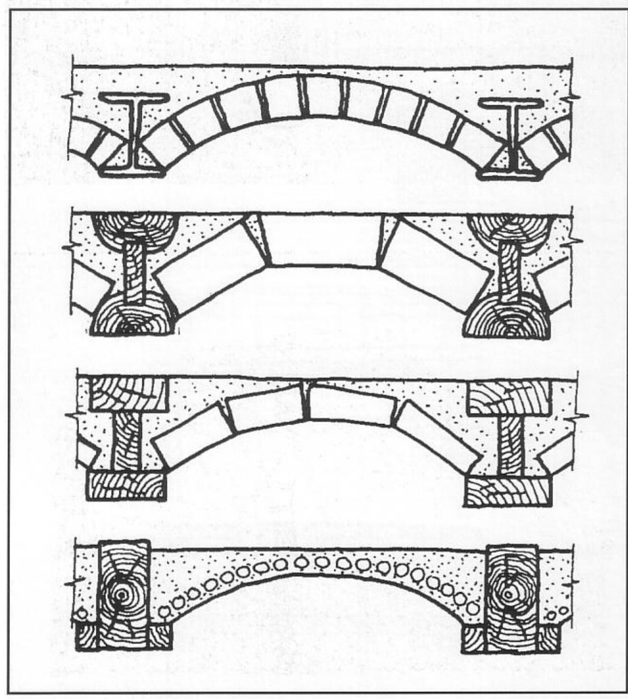
14.3-3 Entrepiso *Wickel*



14.3-4 Sección vertical de un entrepiso de madera con relleno de adobes


14.3-5 Muestra de la colocación de los ladrillos par la solución A

apisona barro alivianado con paja por encima hasta formar lengüetas entre los listones. Las lengüetas se apisonan posteriormente con un plancha para cubrir los listones desde abajo formando así una superficie plana como se muestra en la figura.
Una variante de este piso fue tradicionalmente utilizado empleando un encofrado horizontal móvil en vez de una plancha.


14.3-6 Pisos de bovedillas de barro

- *Rodillos de barro y paja*

Otra técnica tradicional alemana emplea rodillos de barro y paja hechos de la misma forma que se describe en la sección 9.4. Un mazo de paja se sumerge en una lechada de barro y se enrolla alrededor de una estaca formando rodillos de barro con paja. Las estacas ya sea se colocan en las cabeceras sobre la viga o se insertan en ranuras en los bordes de las vigas (Fig. 14.3-3).

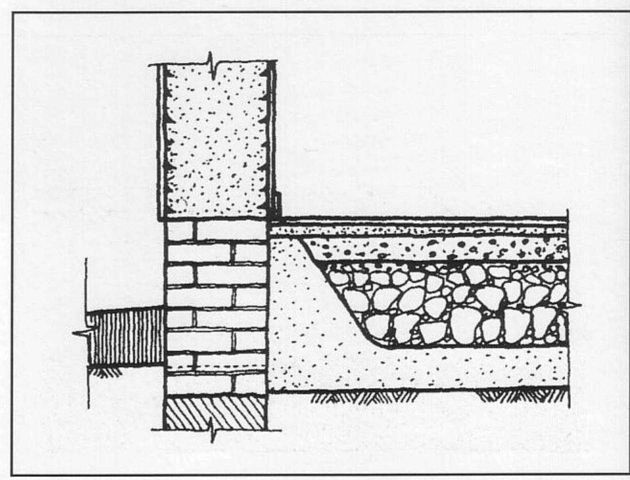
14.3.2 Entrepisos modernos

En vez de rellenos con tierra entre vigas de madera y pisos de entablado, hoy en día se pueden utilizar ladrillos crudos o adobes sin mortero para eliminar el tiempo de secado. La Fig. 14.3-4 A muestra un diseño favorable de este tipo de piso que ofrece suficiente aislamiento contra el ruido aerotransportado y ruido estructural. En la Fig. 14.3-5 se puede observar la colocación de ladrillos crudos. El diseño que se muestra en al Fig. 14.3-4 B, tiene las mismas propiedades pero tiene la ventaja de una altura estructural menor y la desventaja de requerir más tiempo de ejecución.
En la Fig. 14.3-6 se muestran diferentes diseños para pisos abovedados de barro. Los diseños A, B y C utilizan bloques de tierra que bajo esfuerzos de compresión transfieren las cargas a las vigas. El diseño D muestra una bóveda de barro no sometida a esfuerzos construida vertiendo barro alivianado sobre una estera curva de caña brava.

14.4 Pisos de barro apisonado

14.4.1 Generalidades

Las superficies expuestas al desgaste requieren una alta calidad. Estas deben resistir presión, abrasión, ser impermeables y estar libres de fisuras. Es muy difícil construir tales superficies con barro, pero si se ejecutan cuidadosamente no es imposible. Lo más complejo es obtener sufi-


14.4-1 Pisos tradicionales para habitaciones (según Niemeyer, 1947)

ciente resistencia a la abrasión (ver sección 2.6.6). Es a veces más fácil evitar los esfuerzos para alcanzar este requerimiento utilizando sobre el barro revestimientos de cerámica, madera o piedra o cubrir el barro con una alfombra, tela etc.

14.4.2 Pisos tradicionales

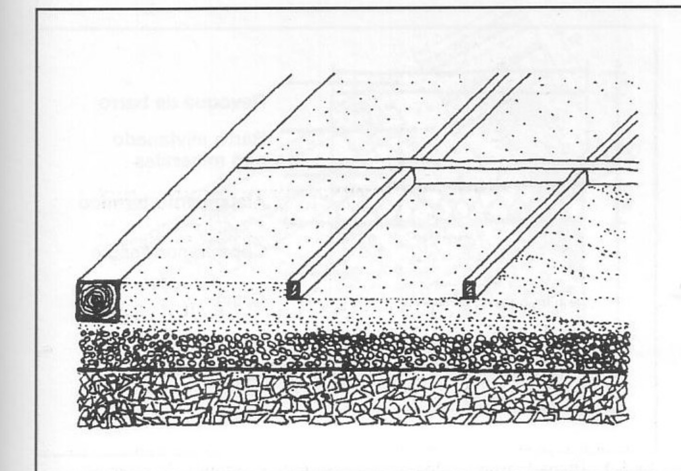
La Fig. 14.4-1 muestra el diseño de Niemeyer para un piso tradicional de barro (Niemeyer, 1946). La capa base consiste en barro de 15 cm de espesor con un alto contenido de arcilla.
Este actúa como una barrera de agua y se aplica en 2 capas que se compactan, apisonando hasta que no aparezcan fisuras durante el secado. La siguiente capa consiste en grava gruesa que interrumpe la acción capilar. Sobre esta, se aplica una capa de 10 cm de espesor de barro alivianado con paja (para el aislamiento térmico). Para la resistencia a cargas mayores, se aplica otra capa de barro alivianado con paja de 4 cm de espesor estabilizado con cemento en proporción 1:6 (1 parte de cemento: 6 partes de barro con paja). Como capa final Niemeyer sugiere un mortero de cemento con aserrín de 2 cm de espesor. Dos capas de silicato sódico líquido se aplican mientras la última capa está aún húmeda. Finalmente la superficie se encera después de secar completamente.
El autor sugiere que el orden de las dos últimas capas se invierta. La grava gruesa se debe emplear como base para interrumpir la acción capilar. El barro con alto contenido de arcilla se aplica como siguiente capa y actúa como una barrera de agua y vapor. El mortero de cemento se puede sustituir con un mortero de barro estabilizado como se describe en la sección 14.4.3.
En las granjas y graneros tradicionales Alemanes se construían pisos de tierra de tal manera que permitieran el tráfico de vehículos (sin gomas neumáticas) sobre ellos. En vez de la superficie con revoque de cemento, se empleaba un barro con alto contenido de arcilla y grandes cantidades de arena gruesa y grava fina. Se aplicaba esta

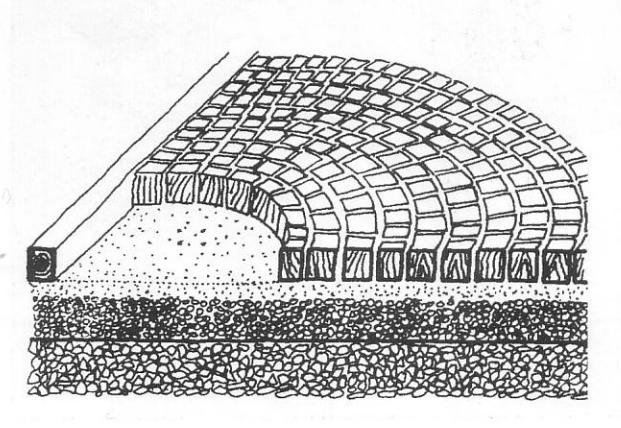


14.4-3



14.4-4





14.4-2 Pisos de tierra modernos (Minke, 1985)



14.4-3 a 14.4-5 Ejecución de un piso de tierra apisonada

mezcla en capas de 7 cm de espesor y se compactaba golpeando. Con el objetivo de endurecer la superficie, esta se rociaba con hojuelas de Fe_3O_4 que quedan como residuo del proceso de forjado del hierro y junto con sangre de toro, bilis o alquitrán se martilla en la superficie.



14.4-6 Ejecución de piso de tierra apisonada con bloques de madera

14.4.3 Pisos modernos

En 1984 en el Forschungslabor für Experimentelles Bauen (FEB), de la Universidad de Kassel, Alemania, se ensayaron exitosamente los dos pisos de barro que se muestran en la Fig. 14.4-2. El diseño A muestra una superficie suficientemente resistente para ser transitada, dividida con una rejilla de madera, mientras que el diseño B muestra un piso de barro pavimentado con bloques de madera.

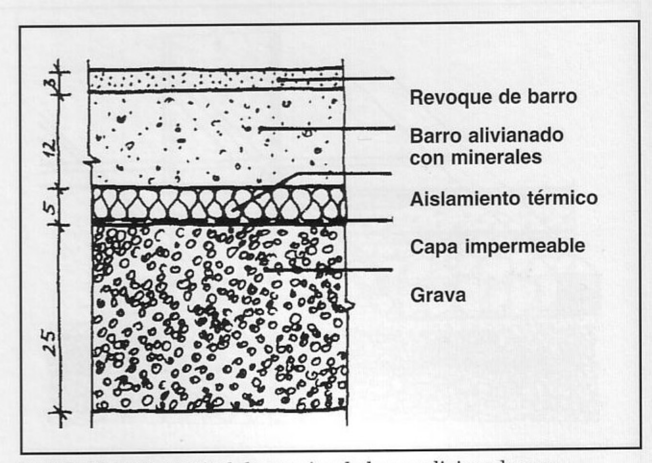
La base es en ambos casos idéntica y consiste en una barrera capilar de 15 cm de espesor de grava, seguida de una barrera de vapor y agua de plástico o cartón asfáltico y concluye con una capa de 10 cm de espesor de arcilla expandida que actúa como aislamiento térmico.

Sobre esta base se coloca y compacta la primera capa de barro arcilloso húmedo (Figs. 14.4-3 y 14.4-4). En ambos casos se coloca una primera rejilla de listones de madera (10x10 cm).

En el diseño B, esta rejilla se rellena con bloques de madera aplicados con mortero de barro estabilizado con 6 a 8% (en volumen) de aceite de linaza doblemente cocido. Los bloques se colocan de tal forma que queden expuestos los anillos anulares (Fig.14.4-6).

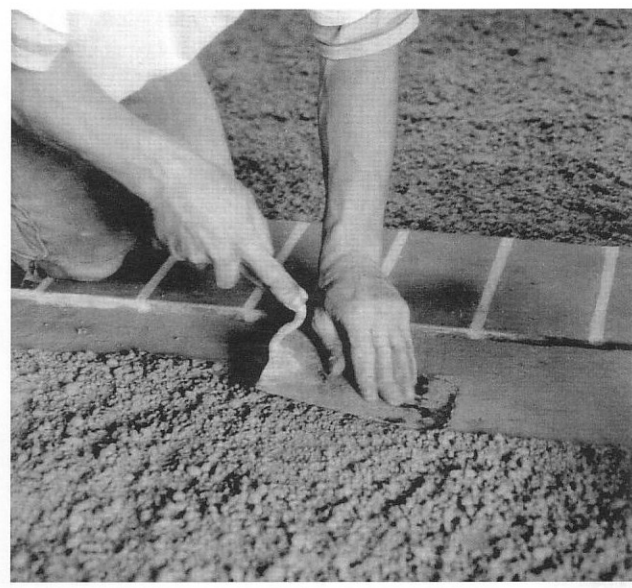
En el diseño A se aplica y compacta una segunda capa de mortero y se coloca una segunda rejilla de madera. Los espacios que se crean se rellenan posteriormente con una tercera capa de mortero estabilizado con 6 a 8% (en volumen) de aceite de linaza doblemente cocido. La superficie se alisa frotando con presión utilizando una llana metálica (Fig. 14.4-5) hasta que la superficie adquiera brillo.

Debido a que este tipo de pisos requieren mucho tiempo de ejecución, el autor desarrollo otro diseño con el que se requiere menos de un quinto de este tiempo para la ejecución. Para este piso, las capas que lo constituyen se observan en la sección de la Fig. 14.4-7. La capa base se ejecuta con grava gruesa con el objetivo de interrumpir la acción capilar. Una capa impermeable de cartón asfáltico se aplica sobre esta, seguido de una base aislante térmica de lana de roca. (Esta capa de lana de roca es solo necesaria debi-



14.4-7 Sección vertical de un piso de barro alivianado con mineral





14.4-8, 14.4-9 Ejecución de pisos de barro alivianado con mineral con un revoque de barro resistente al agua y a la abrasión

Barrera de vapor
Tablones de madera
Barro alivianado (600)
U=0.8 W/m2K

Fibras de celulosa
Barrera de vapor
Plancha de lana de madera
Revoque de barro
U=0.22 W/m2K

Corcho
Barrera de vapor
Barro alivianado con mineral (400)
U=0.25 W/m2K

Corcho
Ladrillos huecos rellenos con barro
Fibras de celulosa
U=0.20 W/m2K

14.5-1 Sección vertical de cubiertas inclinados con relleno de barro alivianado

do a las estrictas exigencias de las normas alemanas de aislamiento térmico, de otra manera el barro alivianado es suficiente). Sobre este se vierte una capa de barro alivianado con mineral de 12 cm de espesor. Este provee el aislamiento térmico suficiente y la requerida resistencia estructural. El barro alivianado se prepara en una mezcladora de hormigón común y se transporta en una carretilla (Fig.14.4-8).
Con el objetivo de reducir el tiempo de fraguado se añadió 4% de cemento a la mezcla. Para obtener una adecuada dureza de la superficie se aplico un mortero de barro de 3 cm de espesor en dos capas (con contenido suficiente de arena gruesa para minimizar la aparición de fisuras de contracción). Para este mortero se ensayaron exitosamente 3 muestras con diferentes agentes estabilizadores (6% en peso seco). La primera, silicato sódico líquido (adicionado luego de rebajarse 1:1 con agua); la segunda, aceite de linaza doblemente cocido; y la tercera cola de cal -caseína (hecha de 1 parte de cal hidratada y 5 de cuajada descremada, mezclada intensamente sin agua durante dos minutos y después se deja reposar) con una adición de 10% de yeso.
Las mezclas se aplicaron como revoques con bajo contenido de humedad y la superficie se aliso con movimientos rotatorios de una llana. Todas estas superficies se enceraron luego de su completo secado. Las tres mezclas obtuvieron una muy buena dureza en la superficie. La mezcla de aceite de linaza tiene la desventaja de tener un olor intenso y un período de secado largo, pero se obtiene con ella la mejor resistencia de la superficie.

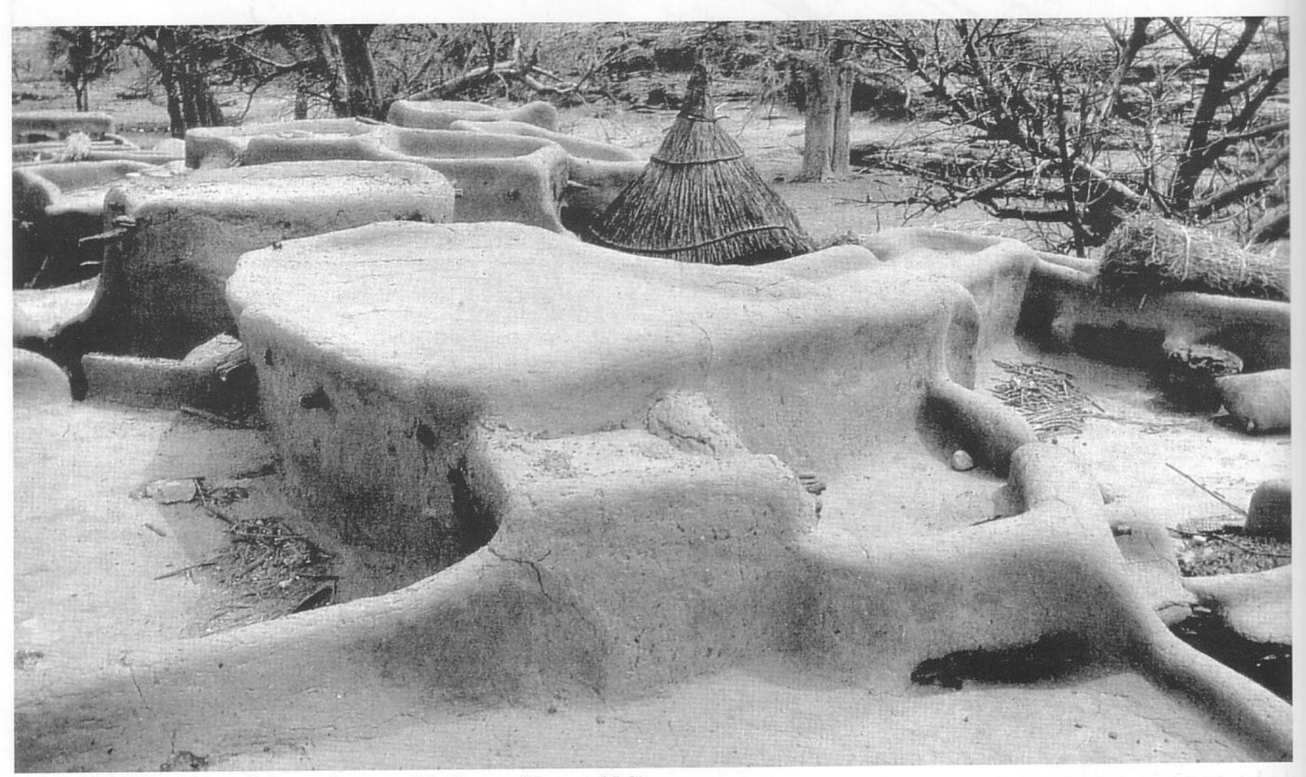
14.5 Cubiertas inclinadas rellenas con barro alivianado

Las cubiertas comúnmente utilizadas de tejas o chapas se pueden rellenar con barro alivianado para aumentar su aislamiento térmico y acústico. Si el espacio creado por un cabio (tijera) típico de 16 cm de altura se rellena con barro alivianado con una densidad de 600 kg/m^3 entre el cielo raso hecho con entablado de madera y la teja, la cubierta alcanza un valor U de 0,8 W/m^{2}K (Fig. 14.5-1 A). En esta figura se ilustran tres soluciones B, C y D para alcanzar un aislamiento térmico más alto, necesario en países con climas más fríos.

14.6 Cubiertas con recubrimientos de barro

14.6.1 Generalidades

Cubiertas planas con recubrimientos de tierra se utilizaron durante siglos en la arquitectura rural tradicional en climas secos. Uno de los desafíos más grandes en la construcción en países en vías de desarrollo es hacer exitosa la construcción de cubiertas de barro resistentes a las inclemencias del tiempo que prueben ser durables en zonas lluviosas. Los costos de una estructura de cubierta típica en dichos países en viviendas de bajo costo es de 25 a 30% del total de la construcción.
Las tejas de barro (sección 7.6) se difundieron en Alemania a comienzos del siglo XX, incluso se creó una norma



14.6-1 Cubiertas planas de barro de un pueblo Dogon, Shanga, Malí

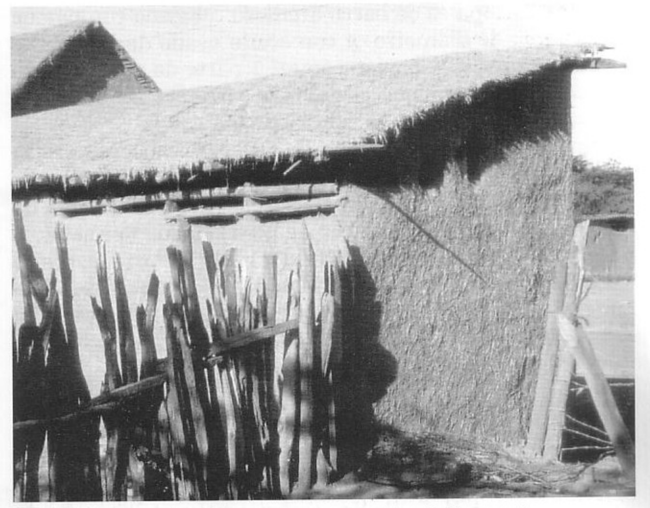
(DIN 18957). Algunas cubiertas tradicionales de barro y experimentos recientes con recubrimientos de barro se explican en esta sección.

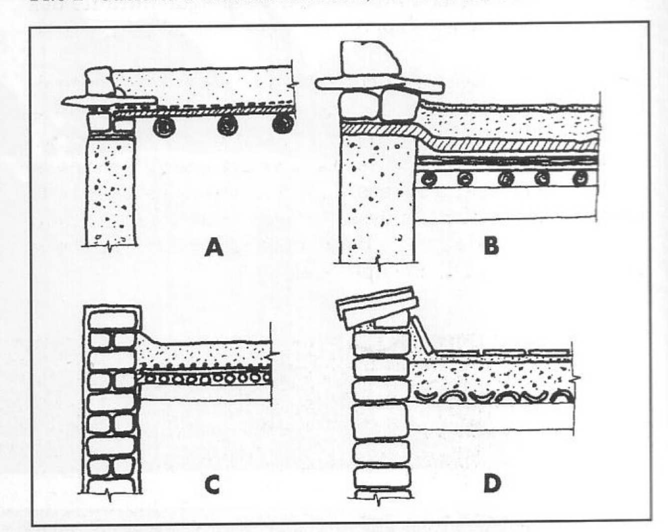
14.6.2 Cubiertas tradicionales

En muchos climas subtropicales, moderados y fríos se han construido por siglos cubiertas de barro algunas veces incluso inclinadas. Los cubiertas planas de los Indios Pueblo en Nuevo México, Estados Unidos (Fig. 6.2-1) y de los Dogones de Mali, Africa (Fig. 14.6-1) son ejemplos típicos. Usualmente rollizos de madera o bambú forman el elemento estructural primario. Sobre estos se colocan ramas y leños formado una malla densa sobre la cual se puede apisonar barro con paja. La etapa final consiste en varias capas de barro arcilloso que usualmente contiene una gran cantidad de arena gruesa con pelo, fibra o estiércol de vaca que se alisan cuidadosamente.
En áreas poco lluviosas las fisuras por contracción no son un problema. Cuando el agua atraviesa estas fisuras el barro arcilloso se expande y sella las fisuras. Solo en algunos casos se aplican capas adicionales. En Anatolia, Turquía, se emplea suelo arcilloso con alto contenido de sal de los bancos en los lagos de sal con el objetivo de sellar las cubiertas de barro. Esta arcilla se mantiene húmeda por largos períodos debido a la propiedad higroscópica de la sal previniendo la penetración de agua mientras esta se mantiene en este estado. Si aparecen grietas de contracción durante el secado, la expansión provocada por las lluvias las sella. Cuando la lluvia lava parte de la sal disminuyendo el efecto de autosellado de la capa superior, los residentes rocían sal o agua salada hasta regenerar esta propiedad de la cubierta (Dalockay, 1969).
Cuando se construyen cubiertas lisas recubiertas con barro se debe tener en cuenta que los bordes de las mismas son susceptibles a los daños mecánicos especialmente por el viento y la erosión del agua. Estos se pueden prevenir con soluciones del tipo que se muestran en la Fig. 14.6-3. Si la superficie de la cubierta es transitable se recomiendan tejas (Fig. 14.6-3 D).
La Fig. 14.6-2 muestra una cubierta inclinada en el Norte de Venezuela que consiste en capas de estiércol de vaca estabilizada con mortero de barro con paja, aplicado en varias capas (8 a 12 cm), sobre una sub-estructura de madera hecha de ramas y leños. Luego de la temporada lluviosa, la capa superior normalmente se rehace.

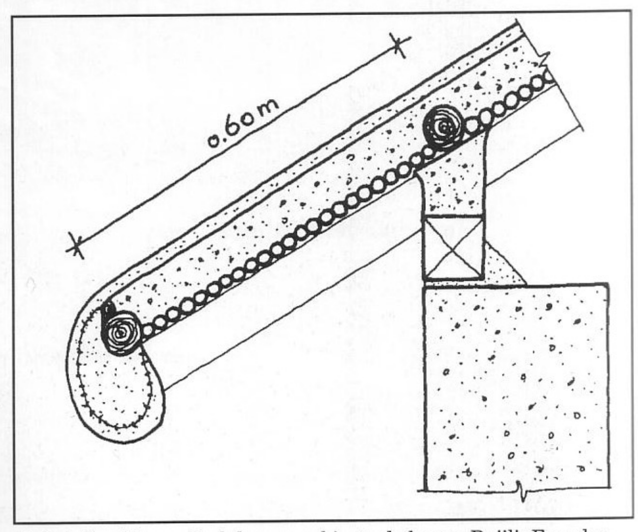
14.6.3 Soluciones innovadoras

En zonas lluviosas donde los cubiertas inclinadas son comunes, las edificaciones tradicionales no tienen cubiertas de barro. Sin embargo, investigaciones recientes han probado que es posible incrementar la resistencia del barro a la lluvia utilizando aditivos. Basados en ensayos realizados en el FEB, descritos en la sección 4.3, el grupo FUNHABIT de Quito y el autor construyeron un prototipo de una vivienda rural de bajo costo en Pujili, Ecuador. La cubierta es una sub-estructura de troncos de madera, ramas y raíces. Esta se cubrió con varias capas de mortero de barro de 8 cm de espesor en total (Fig. 14.6-4).


14.6-2 Cubierta tradicional de barro, norte de Venezuela



14.6-3 Cubiertas planas tradicionales de barro



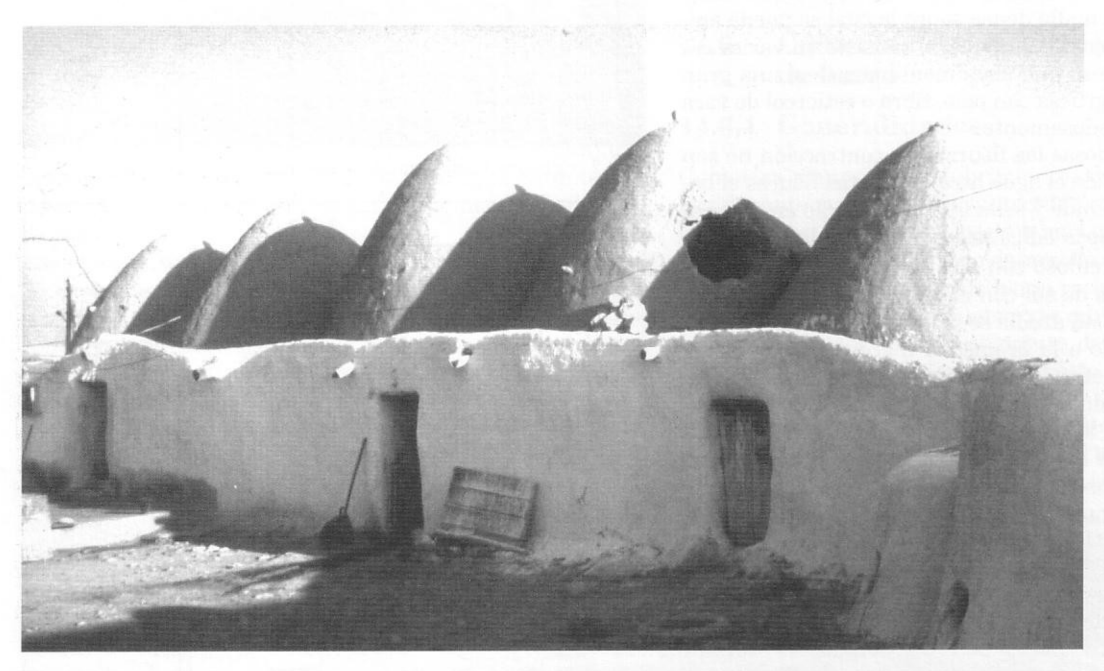
14.6-4 Sección vertical de una cubierta de barro, Pujili, Ecuador

La primera capa es de barro arcilloso rebajado con pómez (0 a 12 mm de diámetro) y con aceite usado de motor (52 partes de barro: 28 partes pómez: 1 parte de aceite). Esta mezcla provee asimismo aislamiento térmico, se aplica en consistencia plástica y se compacta golpeando.
La capa superior de 2 a 3 cm de espesor se ejecutó con la siguiente mezcla: 72 partes de barro, 36 partes de pómez (0 a 5mm), 12 partes de estiércol de vaca, 12 partes de estiércol de burro, 8,5 partes de aceite usado de motor, 6 partes de fibras de sisal (3 a 5 cm largo) y 1 parte de aceite de linaza doblemente cocido. Luego de algunos días después que la mezcla estaba casi seca, se recompactó con una llana metálica con gran presión hasta que la superficie quedara brillante.

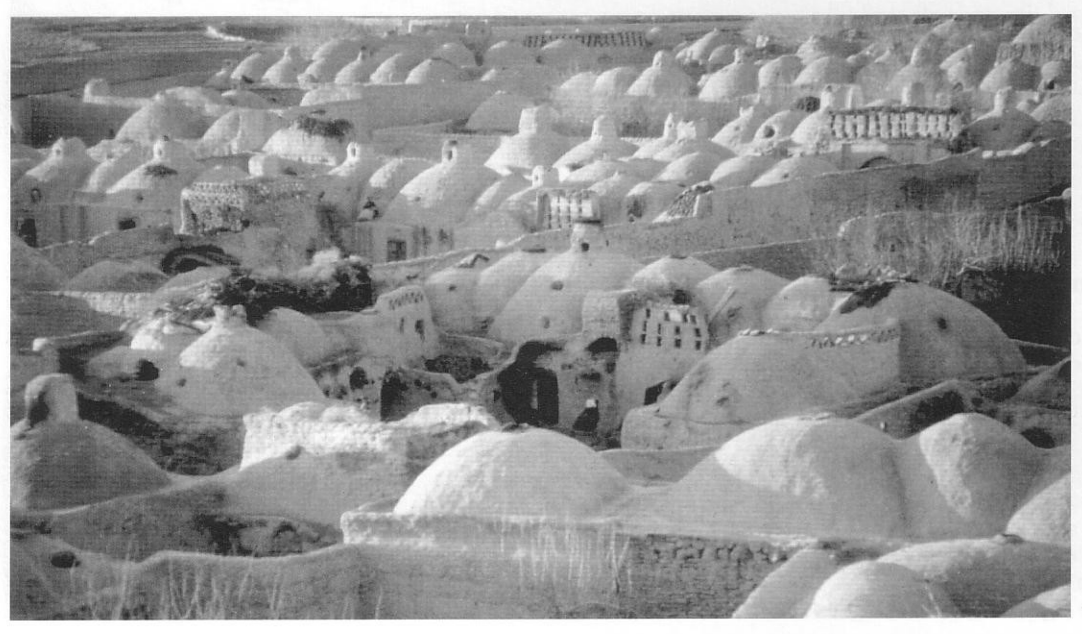
14.7 Bóvedas y cúpulas de adobe

14.7.1 Generalidades

Espacios cubiertos por bóvedas y cúpulas de adobe o bloques de tierra se encuentran principalmente en edificaciones religiosas en Europa. Por otra parte en Asia, Africa y al sur de Europa se utilizaron también en residencias, oficinas y edificios públicos (ver Fig. 1.2-1, 1.2-3, 14.7-1, y 14.7-2).



14.7-1
Cúpulas de bloques de tierra, pueblo cerca de Aleppo, Siria

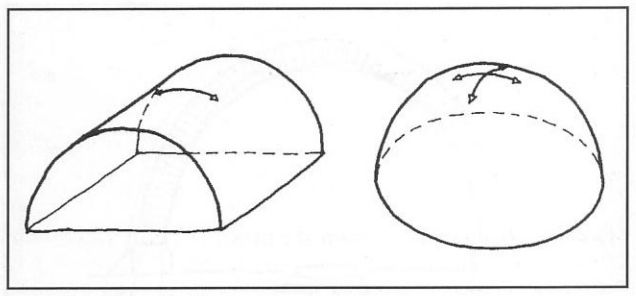


14.7-2
Cúpulas de adobe, Siestan, Afganistán

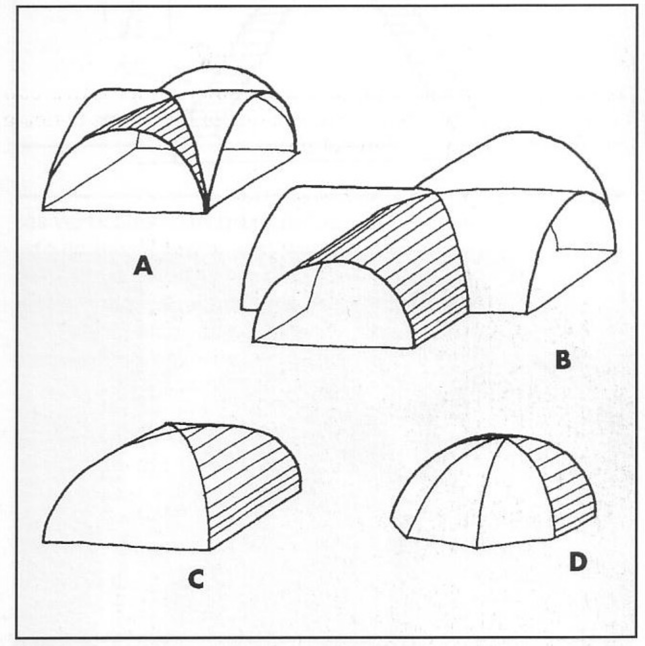
Estas estructuras demostraron tener varias ventajas en climas cálidos y secos especialmente en áreas con altas temperaturas diurnas.
Estas proveen mejor control climático natural que los espacios cúbicos usuales, debido a su masa térmica inherente y su altura en el centro de la cúpula, donde el aire caliente (que es más liviano) fácilmente puede ser descargados por las aberturas. Estas tienen una superficie menor que los espacios cúbicos con el mismo volumen y por ello menor ganancia térmica.
En climas fríos y moderados las bóvedas y cúpulas también tienen varias ventajas. Debido a que la superficie es menor para un mismo volumen, la pérdida de calor es menor, reduciendo así la energía necesaria para calentar los espacios.
En todos los climas, las cúpulas y bóvedas requieren menos material de construcción para un mismo volumen de espacio. La construcción de bóvedas y cúpulas en países en vías de desarrollo es usualmente más económica en relación a cubiertas planas o ligeramente inclinadas.
Hasta ahora se han construido bóvedas y cúpulas de barro solo con adobes o bloques de tierra, exceptuando dos cúpulas experimentales: la cúpula de tapial descrita en la sección 5.7 y la de *stranglehm* descrita en la sección 8.4.6.
Muchas zonas áridas de nuestro planeta no poseen madera, por lo que se han desarrollado técnicas para construir cúpulas y bóvedas de bloques de tierra no solo sin vigas estructurales sino también sin encofrados. Esas técnicas se describen en las secciones siguientes.

14.7.2 Geometría

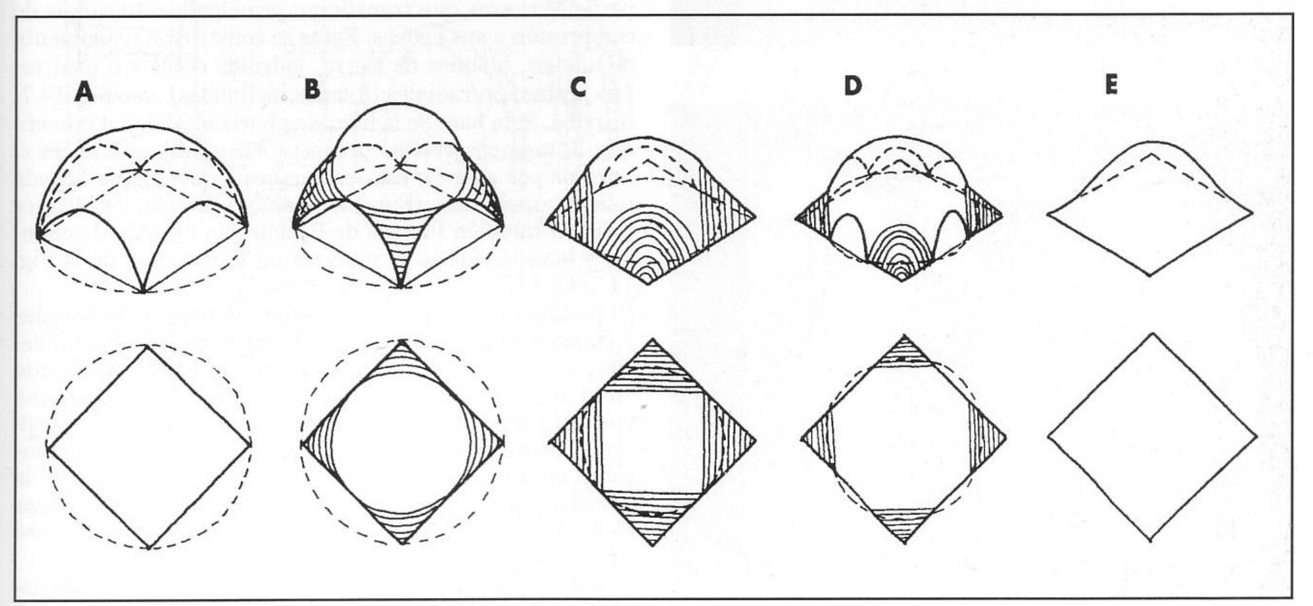
Las bóvedas y cúpulas son elementos estructurales curvos bidimensionales que sirven para cubrir espacios. Las bóvedas y cúpulas de mampostería solo trasmiten las cargas



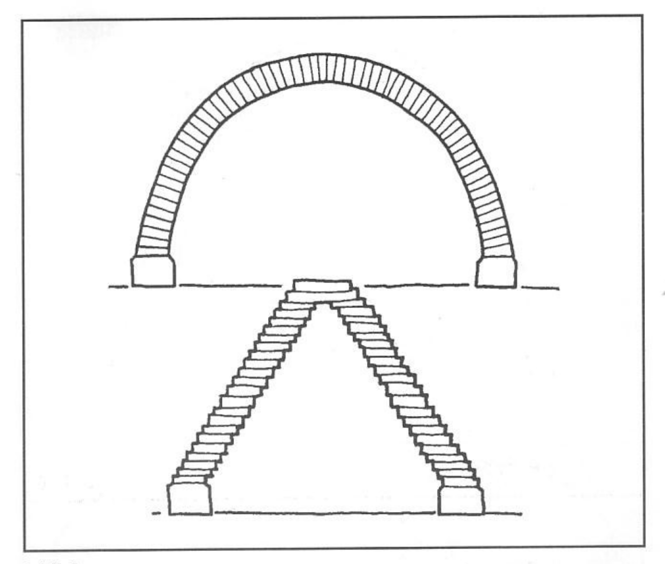
14.7-3Bóveda y cúpula

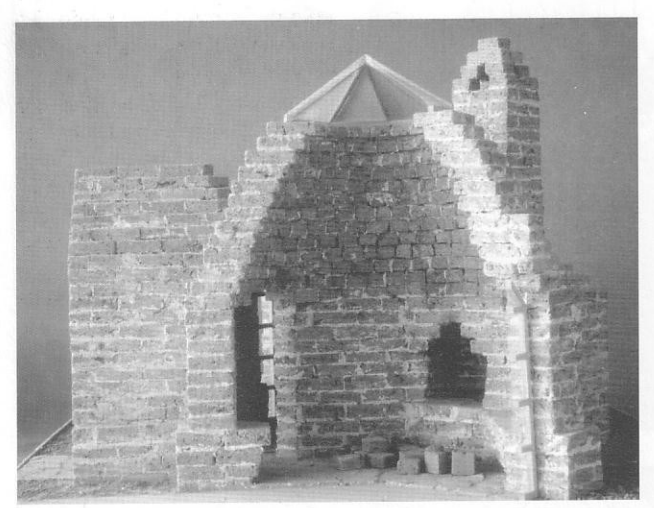


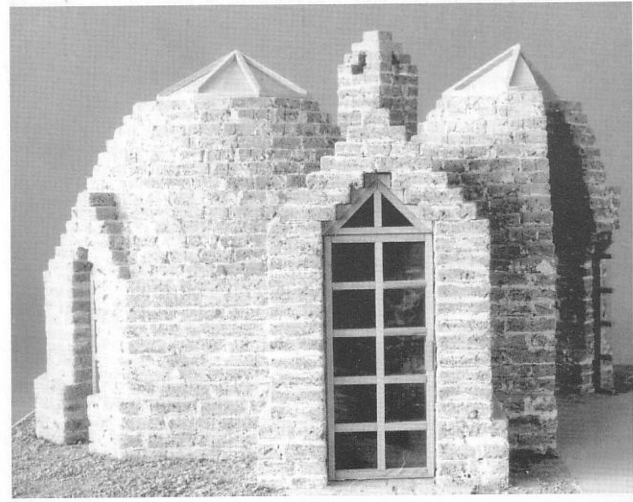
14.7-4



14.7-5 Tipos de cúpulas sobre plantas cuadradas


14.7-6


14.7-7


14.7-8

a compresión. Si la superficie tiene una sola curvatura se denominan bóvedas (Fig. 14.7.3, izquierda) y si la superficie tiene una curvatura doble (en dos direcciones) se denominan cúpulas (Fig. 14.7.3 derecha). La Fig. 14.7-4 muestra diferentes formas de cubiertas que se crear con bóvedas. Con cúpulas formando superficies de revolución (que son por lo general parte de esferas) que deben cubrir espacios cuadrados, ocurre un problema geométrico de traslación de la geometría cuadrada de la planta a la geometría circular de la cúpula. En la Fig. 14.7-5 se muestran cuatro sistemas diferentes para resolver este problema.

La solución A es una cúpula truncada, en la que la base del circular de la cúpula descansa en los bordes de la planta cuadrada y en la que planos verticales interceptan la superficie formando arcos. La solución B se denomina cúpula de pechina. En ella una cúpula hemisférica descansa sobre la parte inferior de una cúpula truncada. El triángulo doblemente curvilíneo se denomina pechina. La solución C muestra una cúpula en la que la base circular se inscribe en la planta cuadrada y las superficies de interconexión se componen de una serie de arcos de radio creciente.

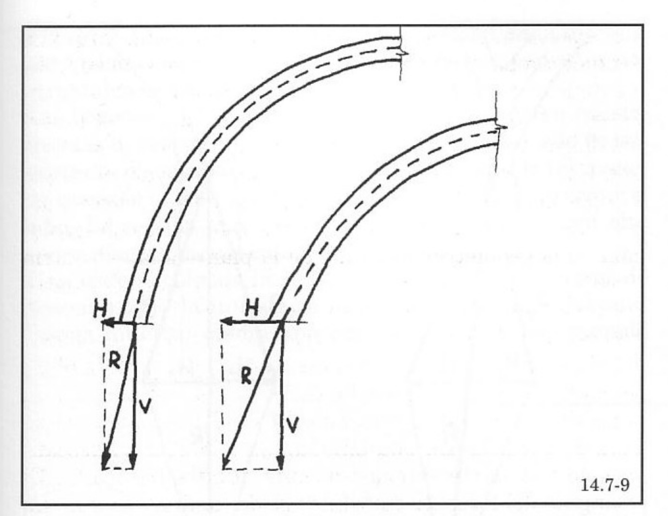
La solución D es parecida a la solución C, pero en ella la base circular de la cúpula descansa sobre el octógono inscrito en la planta cuadrada, formando planos truncados sobre cuatro de los lados y los otros cuatros se cierran con una serie de arcos de radio creciente. La solución E muestra una solución totalmente distinta. En ella una curvatura doble de cambio continuo que comienza en las esquinas con una curvatura anticlástica (una curvatura convexa en una dirección y cóncava en la dirección perpendicular) y termina en el ápice con una curvatura sinclástica (una curvatura que es igualmente curva en ambas direcciones).

14.7.3 Comportamiento estructural

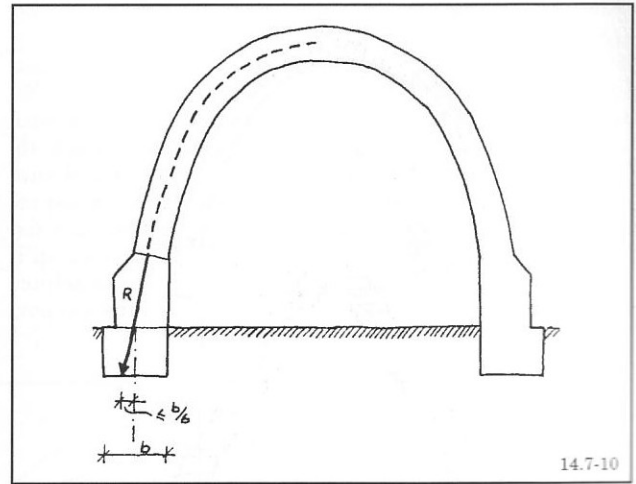
Estructuralmente hablando las bóvedas y cúpulas son superficies curvas que transfieren principalmente cargas de compresión a sus apoyos. Estas se construyen usualmente de adobes, bloques de tierra, ladrillos cocidos o piedras. Las juntas son radiales (hiladas inclinadas), ver Fig. 14.7-6 arriba. Si la base de la hilada es horizontal de tal manera que la mampostería se proyecte sucesivamente hacia el interior por avance, esta estructura se denomina bóveda falsa o cúpula falsa (Fig. 14.7-6 abajo). En ella los bloques resisten también fuerzas de flexión. Un ejemplo de cúpulas y bóvedas falsas se muestra en la maqueta de la Fig. 14.7-7 y 14.7-8.

El problema principal en el diseño estructural de bóvedas y cúpulas es la transferencias de los empujes a las fundaciones. La Fig. 14.7-9 muestra como la fuerza resultante en el arranque puede separarse en dos componentes una vertical y una horizontal. Mientras más inclinada la resultante menor su componente horizontal. Una regla importante para el diseño y cálculo es que la resultante de la bóveda y cúpula debe bajar por el medio tercio de la base de la fundación. Esto significa que la excentricidad debe ser menor o igual a 1/6 del espesor (Fig. 14.7-10).

Debido a que esta consideración puede requerir fundaciones muy grandes y por ello de costos elevados se pueden



14.7-9

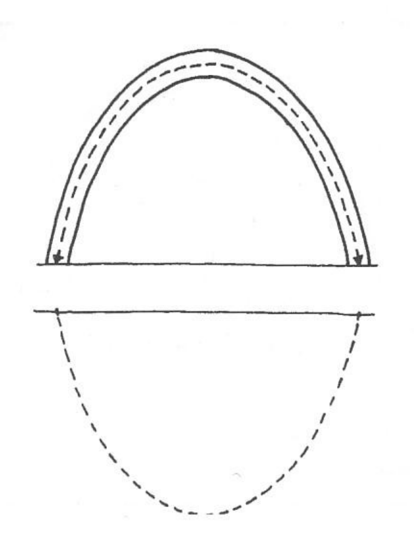


14.7-10

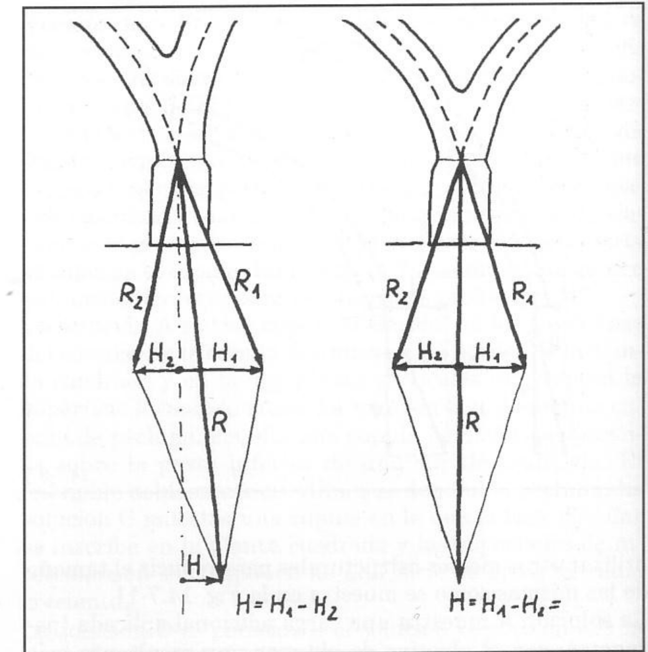
utilizar otros medios estructurales para reducir el tamaño de las mismas como se muestra en la Fig. 14.7-11.
La solución A muestra una carga adicional aplicada (parapetos) con el objetivo de obtener una resultante más inclinada.
Una segunda solución simple se muestra en B y consiste en contrafuertes. En este caso la distancia entre ellos no debe ser muy grande con el objetivo de contener los momentos de flexión dentro de los límites. Una variante estructuralmente mejor se muestra en C, en la que los contrafuertes se conectan con bóvedas en su cúspide. La solución D muestra elementos estructurales de tensión en el piso que neutralizan los empujes haciendo que solo las fuerzas verticales sean trasmitidas a la fundación. Por ejemplo esto se puede lograr con un piso de hormigón armado. La solución E muestra tirantes vistos que actúan de la misma manera que el ejemplo anterior. Se ejecutan sobre los muros que soportan la bóveda. En este caso se debe ejecutar una viga que absorba las fuerzas de flexión entre los extremos de los tirantes.
Las soluciones F y G muestran dos posibilidades de reducir el efecto de los empujes provocados por una cúpula central por medio de bóvedas y cúpulas actuando como contrafuertes.
Si dos bóvedas iguales se unen en una fundación, las componentes horizontales de sus resultantes se anulan, ver

A B C D
E F G

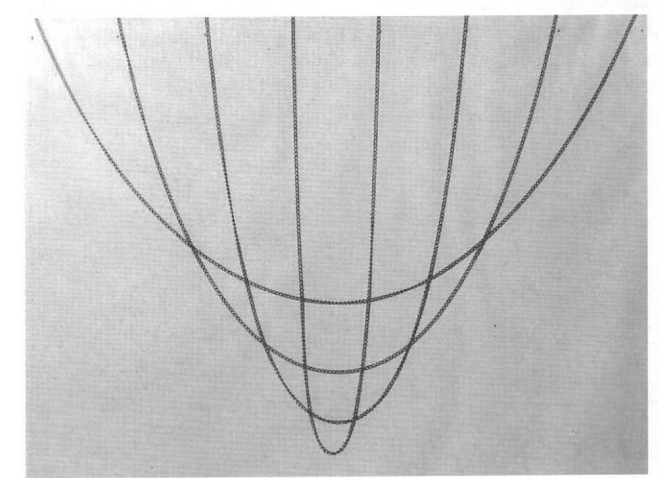
14.7-11



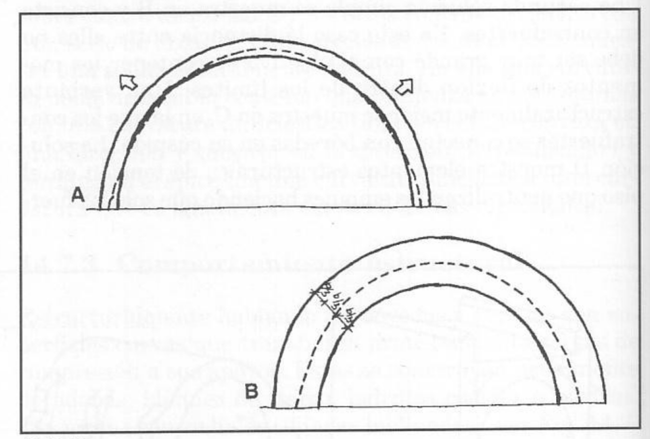
14.7-13



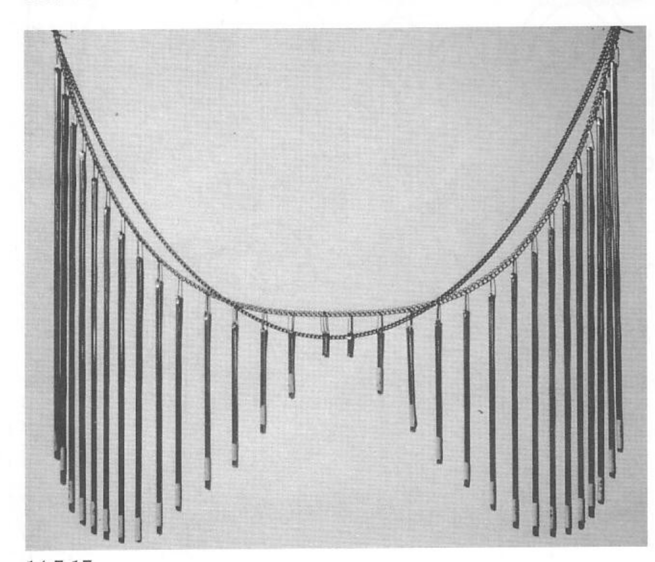
14.7-12



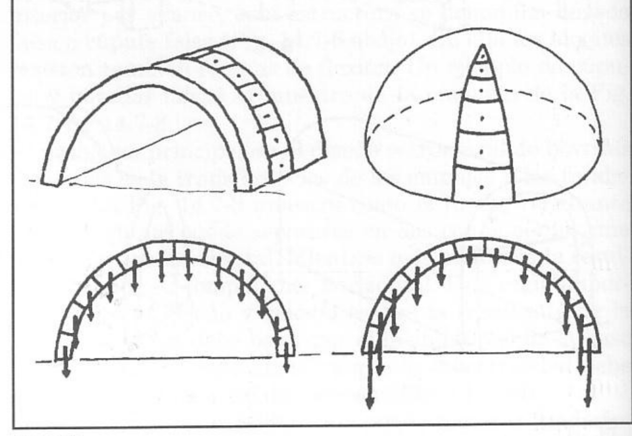
14.7-14



14.7-15

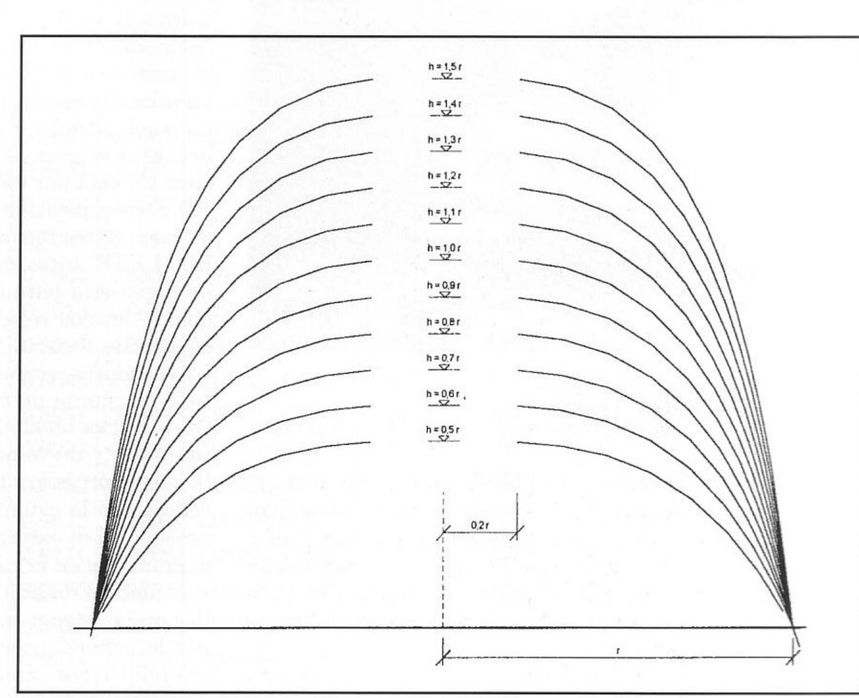


14.7-17

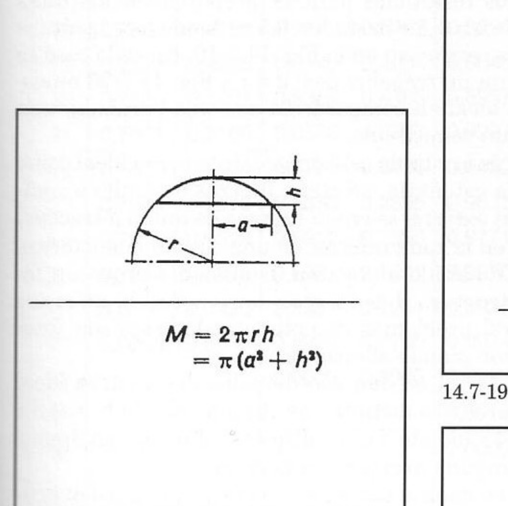


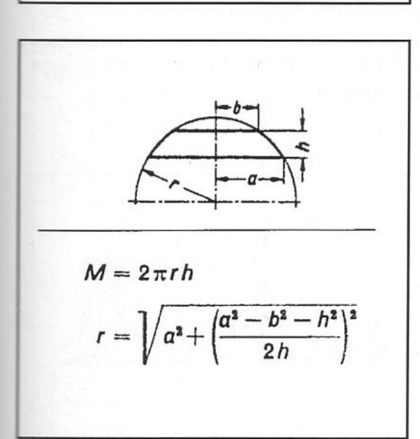
14.7-16

Fig. 14.7-12 derecha. Si por otro lado estas tienen diferentes inclinaciones solo una parte de estos componentes horizontales se anulan (Fig. 14.7-12 izquierda).
Las bóvedas y cúpulas de bloques de tierra pueden resistir fuerzas de tracción y flexión muy pequeñas, por ello es importante diseñar el perfil de estas estructuras de tal manera que solo (o casi solo) puedan ocurrir fuerzas de compresión. La sección transversal ideal de una bóveda con alta carga muerta es una catenaria invertida.
Una cadena colgada libremente que tiene solo fuerzas de tracción bajo la influencia de la carga de sus eslabones (carga muerta) forma una curva específica denominada catenaria. Si esta curva se invierte define la línea de soporte ideal (línea de empuje) para una bóveda en la que solo ocurren fuerzas de compresión bajo cargas muertas (Fig. 14.7-13). Esta línea se puede medir con la formula catenaria y= a cosh(x/a) y puede definirse con la posición de dos puntos de apoyo y la cima (ver Fig. 14.7-14). En una bóveda semicircular la línea de presiones no atraviesa por el centro del espesor de la bóveda. Esta puede bajar incluso fuera de la estructura como se muestra en la Fig. 14.7-15 A. Esto provoca fuerzas de flexión y puede conllevar a fallas en la estructura. Si el espesor de la bóveda es suficientemente grande para contener la línea de

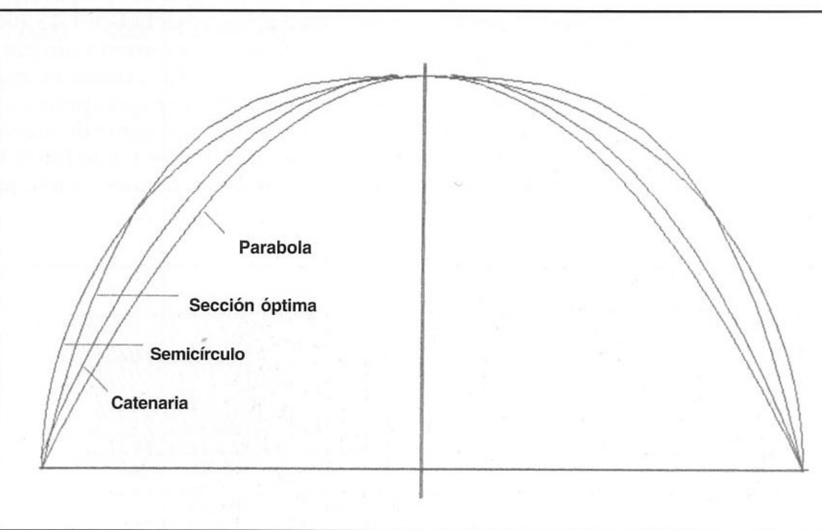


14.7-19





14.7-18 Superficies de cúpulas

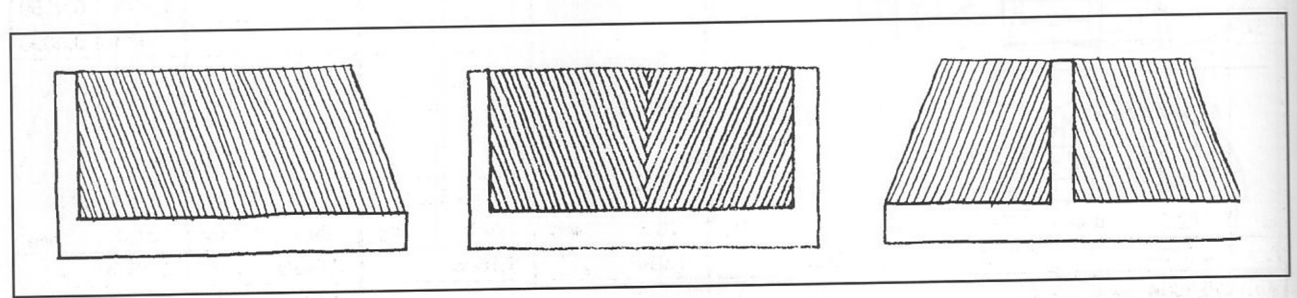


14.7-20



14.7-21

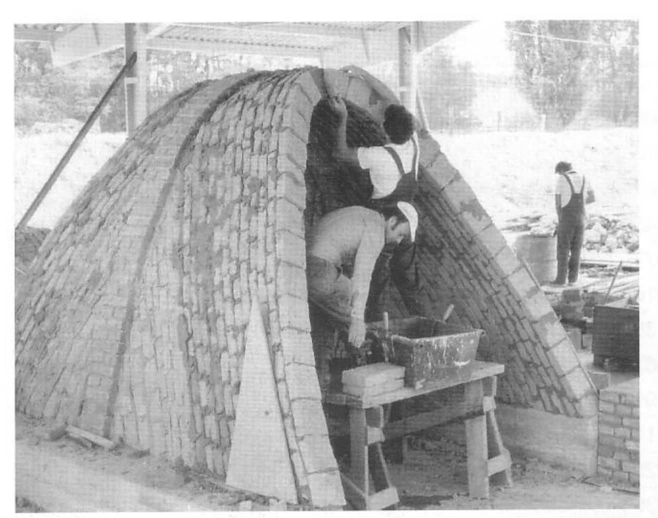
presiones dentro de su medio tercio (Fig. 14.7-15 B) este peligro no existe.
La sección ideal de una cúpula bajo carga muerta es aquella en la que solo se crean fuerzas de compresión que bajan verticalmente sin crear fuerzas de anillo a tensión, ni a compresión. Si la sección transversal tiene la forma de una catenaria ocurren fuerzas de anillo a compresión. Esto puede ser desventajoso si se tienen que hacer aberturas grandes en la cúpula.
Para obtener la forma ideal de una bóveda se toma una porción como se muestra en la Fig. 14.7-16 izquierda, y se divide en segmentos de la misma longitud. Así se obtienen segmentos con áreas idénticas y por ello pueden sustituirse por cargas simples de igual magnitud actuando en el centro de cada segmento.
Sin embargo en el caso de una cúpula si tomamos una porción como se muestra en la figura a la derecha y dividimos la misma en segmentos de igual longitud, los anchos decrecen y por ello las áreas decrecen continuamente de la base a la cima. Si estos segmentos se sustituyen por cargas simples estas también decrecen proporcionalmente. En la Fig. 14.7-17, se puede ver como se puede obtener la curva ideal a partir de un modelo, esta curva ideal se muestra en contraste con una catenaria. En la Fig. 14.7-18 se ofrece una formula para calcular áreas de segmentos de una esfera. Sin embargo debido a que la forma ideal no es esférica, sus segmentos tienen un área ligeramente distinta de la que partimos. Por ello, este procedimiento debe considerarse como una primera aproximación, que en la practica es suficientemente exacto para luces pequeñas. Mayor exactitud se puede alcanzar con iteraciones (repeticiones) sucesivas substituyendo el actual radio de variación de la curvatura de los segmentos de acuerdo a las medidas tomadas del modelo y ajustando las cargas de acuerdo a las áreas de la superficie de los segmentos así calculados.
La primera aseveración (que una cúpula es un hemisferio) no puede utilizarse si la altura no es igual a la mitad de la luz. En ese caso se debe partir de la forma de una elipse cuyo eje está por debajo de la base de la cúpula (Fig. 14.7-19). Esta suposición de partida se acerca ya a la forma ideal que puede ser mejorada con el modelo.
En el FEB, estos métodos se utilizaron métodos gráficos de ingeniería para desarrollar un programa de computadora. Algunos resultados para 11 proporciones distintas de cúpulas de h= 1,5 r hasta h= 0,5 r (donde h es la altura y r el radio) se expresan en la Fig. 14.7-19. En cada caso se tuvo en cuenta un tragaluz de 0,2 r. La Fig. 14.7-20 muestra la curva ideal en comparación con una parábola, una catenaria y un semicírculo.
Si la sección de la cúpula está dentro de la curva ideal como ocurre con la catenaria, se crean fuerzas de anillo a compresión. Si es externa se crean fuerzas de anillo a tracción al igual que en la zona inferior de una cúpula hemisférica. Las fuerzas de anillo a tracción usualmente provocan fallas en la estructura. Las fuerzas de compresión no crean por lo general problemas excepto cuando estas son interrumpidas por grande aberturas.
En la tabla 14.7.1 se dan coordenadas de la curva ideal para 7 proporciones distintas de cúpulas, desde h = 0,8 r hasta h = 1,4 r (donde h es la altura y r el radio), sin tomar en cuenta ninguna abertura en la cima.
Para tomar en cuenta cargas asimétricas que pueden ocurrir en la practica por el viento, mantenimiento, etc. y para asegurar de manera que no ocurran fuerzas de tracción es mejor mantener la sección dentro de la curva ideal especialmente en la parte superior.

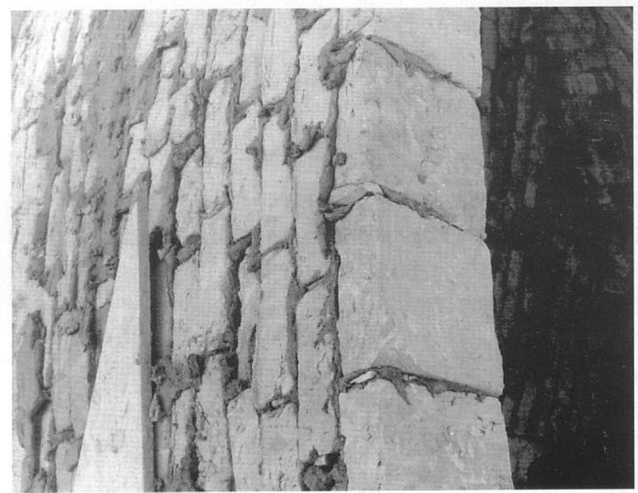


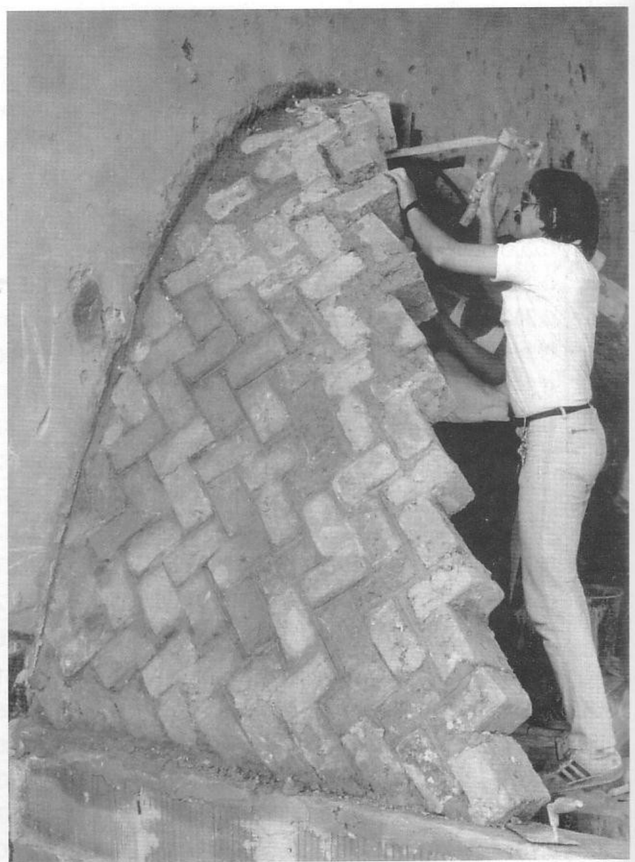
14.7-22

Tabla 14.7-1

Nr.	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x	y	x
1	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000	0,0000	1,0000
2	0,0452	0,9854	0,0454	0,9875	0,0479	0,9885	0,0470	0,9902	0,0422	0,9912	0,0494	0,9918	0,0469	0,9929
3	0,0973	0,9674	0,0982	0,9720	0,1013	0,9750	0,1007	0,9783	0,1016	0,9807	0,1036	0,9823	0,1013	0,9844
4	0,1489	0,9483	0,1508	0,9556	0,1544	0,9608	0,1543	0,9658	0,1555	0,9696	0,1578	0,9724	0,1556	0,9755
5	0,2001	0,9279	0,2030	0,9381	0,2073	0,9456	0,2077	0,9526	0,2093	0,9579	0,2118	0,9620	0,2098	0,9662
6	0,2506	0,9061	0,2548	0,9195	0,2600	0,9295	0,2610	0,9386	0,2629	0,9456	0,2657	0,9511	0,2640	0,9565
7	0,3005	0,8827	0,3061	0,8996	0,3123	0,9124	0,3139	0,9237	0,3164	0,9326	0,3195	0,9396	0,3180	0,9462
8	0,3495	0,8575	0,3569	0,8782	0,3642	0,8940	0,3667	0,9079	0,3697	0,9188	0,3732	0,9274	0,3720	0,9354
9	0,3974	0,8303	0,4069	0,8552	0,4156	0,8744	0,4191	0,8911	0,4227	0,9041	0,4267	0,9145	0,4258	0,9241
10	0,4441	0,8011	0,4562	0,8305	0,4665	0,8533	0,4711	0,8730	0,4755	0,8885	0,4800	0,9008	0,4795	0,9121
11	0,4893	0,7695	0,5043	0,8038	0,5167	0,8306	0,5226	0,8536	0,5280	0,8718	0,5331	0,8863	0,5331	0,8993
12	0,5327	0,7355	0,5513	0,7749	0,5660	0,8060	0,5736	0,8328	0,5800	0,8540	0,5859	0,8708	0,5864	0,8858
13	0,5738	0,6987	0,5967	0,7436	0,6143	0,7795	0,6239	0,8103	0,6316	0,8347	0,6384	0,8542	0,6396	0,8714
14	0,6124	0,6592	0,6402	0,7097	0,6613	0,7507	0,6733	0,7860	0,6827	0,8140	0,6905	0,8364	0,6924	0,8561
15	0,6479	0,6170	0,6815	0,6731	0,7067	0,7194	0,7217	0,7596	0,7330	0,7917	0,7422	0,8173	0,7450	0,8397
16	0,6799	0,5721	0,7200	0,6337	0,7502	0,6855	0,7688	0,7309	0,7825	0,7674	0,7932	0,7966	0,7971	0,8220
17	0,7081	0,5246	0,7554	0,5913	0,7913	0,6487	0,8143	0,6998	0,8309	0,7411	0,8436	0,7743	0,8488	0,8030
18	0,7322	0,4750	0,7872	0,5462	0,8296	0,6090	0,8578	0,6658	0,8780	0,7124	0,8930	0,7500	0,8999	0,7825
19	0,7522	0,4235	0,8149	0,4984	0,8646	0,5663	0,8988	0,6290	0,9234	0,6811	0,9414	0,7235	0,9503	0,7602
20	0,7680	0,3707	0,8384	0,4485	0,8957	0,5207	0,9369	0,5891	0,9667	0,6470	0,9883	0,6947	0,9998	0,7360
21	0,7801	0,3168	0,8576	0,3967	0,9227	0,4725	0,9716	0,5461	1,0076	0,6099	1,0336	0,6632	1,0482	0,7096
22	0,7887	0,2624	0,8725	0,3436	0,9452	0,4221	1,0023	0,5002	1,0453	0,5696	1,0767	0,6287	1,0951	0,6807
23	0,7944	0,2076	0,8836	0,2896	0,9633	0,3700	1,0286	0,4517	1,0795	0,5262	1,1172	0,5912	1,1403	0,6491
24	0,7978	0,1526	0,8912	0,2350	0,9771	0,3165	1,0504	0,4009	1,1095	0,4799	1,1544	0,5505	1,1830	0,6145
25	0,7994	0,0975	0,8961	0,1801	0,9870	0,2623	1,0675	0,3485	1,1350	0,4309	1,1879	0,5065	1,2236	0,5768
26	0,8000	0,0425	0,8987	0,1251	0,9936	0,2075	1,0804	0,2948	1,1557	0,3798	1,2170	0,4596	1,2606	0,5358
27	0,8000	0,0000	0,8998	0,0700	0,9974	0,1526	1,0894	0,2404	1,1719	0,3270	1,2415	0,4101	1,2933	0,4915
28			0,9000	0,0000	0,9993	0,0975	1,0951	0,1856	1,1836	0,2731	1,2611	0,3585	1,3222	0,4443
29					0,9999	0,0425	1,0983	0,1306	1,1916	0,2185	1,2761	0,3054	1,3459	0,3944
30					1,0000	0,0000	1,0997	0,0755	1,1965	0,1636	1,2867	0,2513	1,3648	0,3425
31							1,1000	0,0205	1,1990	0,1086	1,2936	0,1966	1,3789	0,2892
32							1,1000	0,0000	1,1999	0,0535	1,2976	0,1416	1,3887	0,2349
33									1,2000	0,0000	1,2995	0,0865	1,3949	0,1801
34											1,3000	0,0315	1,3983	0,1251
35											1,3000	0,0000	1,3997	0,0700
36													1,4000	0,0150
37													1,4000	0,0000
	h = 0,8 r		h = 0,9 r		h = 1,0 r		h = 1,1 r		h = 1,2 r		h = 1,3 r		h = 1,4 r	
α	72,6	deg	75,0	deg	76,9	deg	78,5	deg	79,7	deg	80,7	deg	81,6	deg
A	5,3374	r^2	5,7789	r^2	6,2195	r^2	6,6941	r^2	7,1685	r^2	7,6426	r^2	8,1514	r^2
V	16,1064	r^3	18,2911	r^3	20,4262	r^3	22,6921	r^3	24,9307	r^3	27,1455	r^3	29,5145	r^3


14.7-23


14.7-24


14.7-25

14.7.4 Bóvedas nubicas

Con la técnica de bóveda nubica utilizada durante siglos en Egipto se pueden construir bóvedas sin encofrado utilizando arcos inclinados hechos de adobes. La Fig. 14.7-21 muestra una de estas bóvedas que tiene 3200 años de antigüedad y se mantiene en el Templo de Ramses II cerca de Luxor. Estas bóvedas están comúnmente construidas con adobes de 15 cm de ancho 25 cm de largo y solo 5 a 6 cm de espesor.

Esto significa que el peso de los adobes por unidad de área de junta de mortero es muy bajo para evitar el deslizamiento de los adobes en la posición inclinada durante la construcción. El ángulo de inclinación de los arcos es un factor decisivo en el proceso de construcción. Este debe ser entre 65° y 70° con respecto a la horizontal. Las pruebas demostraron que si los arcos se construyen con ángulos menores la parte inferior de la bóveda puede colapsar durante la construcción y si el ángulo es mayor los adobes no se sostienen en la parte superior.

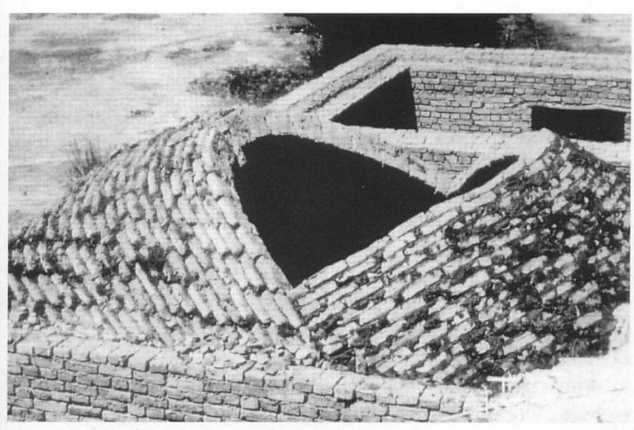
La bóvedas nubicas requieren uno o dos muros verticales sobre los cuales descansan los arcos inclinados (Fig. 14.7-22 A y B). Es posible también apoyar los arcos a un arco central de apoyo que por lo general tiene la sección de la bóveda y debe ser relleno (Fig. 14.7-22 C y 14.7-23).

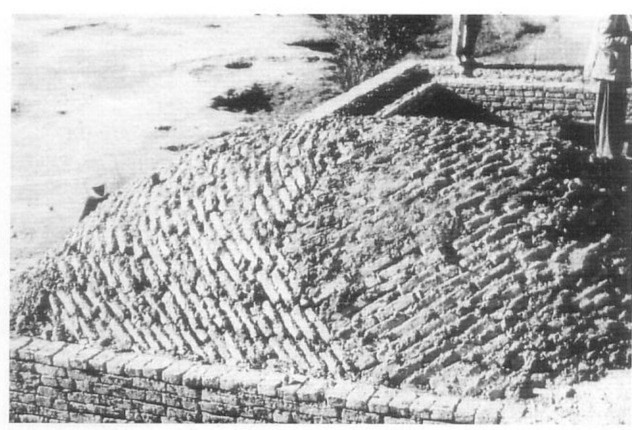
La sección transversal de una bóveda nubica que por lo general está cargada solo por su propio peso, debe tener la forma de una catenaria invertida, de tal manera que solo contenga cargas de compresión.

En el FEB esta técnica tradicional se optimizó mediante dos vías: Primero en vez de utilizar formatos rectangulares se emplean en la base de la bóveda bloques cuadrados de 20 x 20 cm y 6 de espesor y en la parte superior de la bóveda bloques con un acortamiento hasta 1,5 cm, reduciendo así la mano de obra y la cantidad de mortero requeridos.

Utilizando una composición óptima de mortero con alta cohesividad es posible utilizar adobes con un espesor hasta de 10cm que reducen también la cantidad de mortero y el tiempo de ejecución.

En segundo lugar la forma de la bóveda se controló durante la construcción mediante cuerdas ajustadas de un muro de apoyo al otro, fijando solo en un extremo y pasando el otro extremo de la cuerda a través de un anillo fijado a una piedra. Cuando la cuerda se golpea o empuja durante la construcción esta no se rompe pero se reajusta debido al peso.


14.7-26

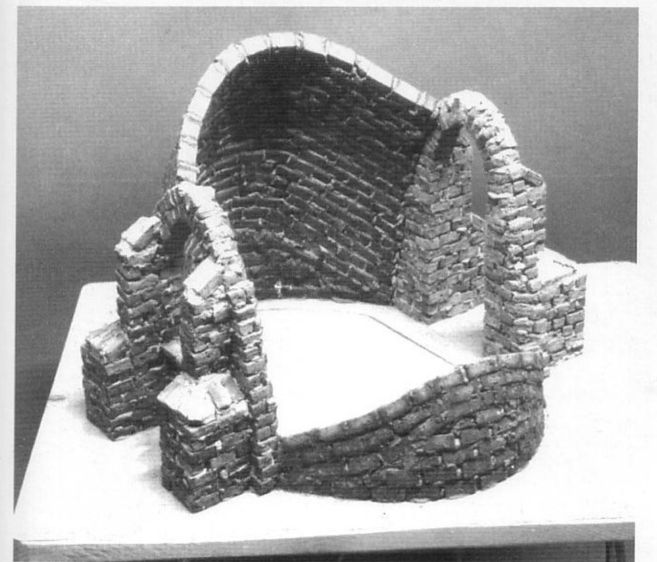

14.7-27

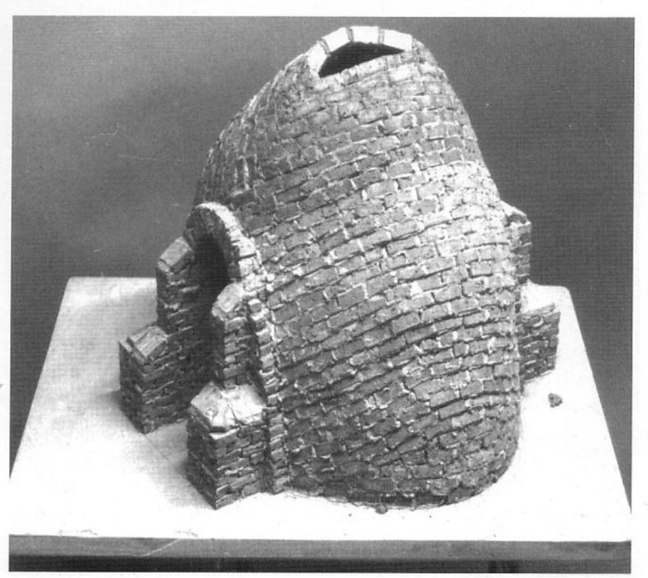
Cuando se construyen los arcos inclinados se aconseja que los adobes que forman los arcos se unan en la esquina interior y si hubieran aberturas en la junta exterior se deberían rellenar con una piedra para evitar movimientos del arco antes de que el mortero seque (Fig. 14.7-24).
Una variación interesante de esta bóveda nubica se muestra en la Fig. 14.7-25 donde se colocan adobes de 10 x 10 x 20 cm en espina de pescado. Cuando esta técnica se ensayo en el FEB mostró una alta estabilidad pero necesita gran esfuerzo para mantener la geometría, la cual debe ser estudiada antes de su construcción con una maqueta.

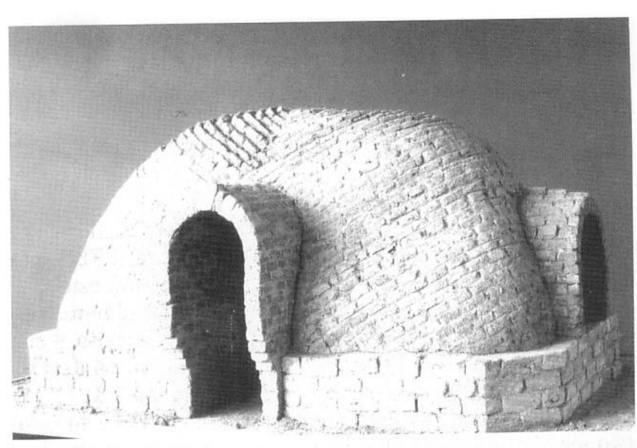
14.7.5 Cúpulas afganas y persas

Una técnica para construir cúpulas sin encofrado se ha utilizado hace siglos en Afganistán. Con esta técnica se realizan cúpulas para techar espacios cuadrados construyendo arcos inclinados con un ángulo de 30° con respecto a la

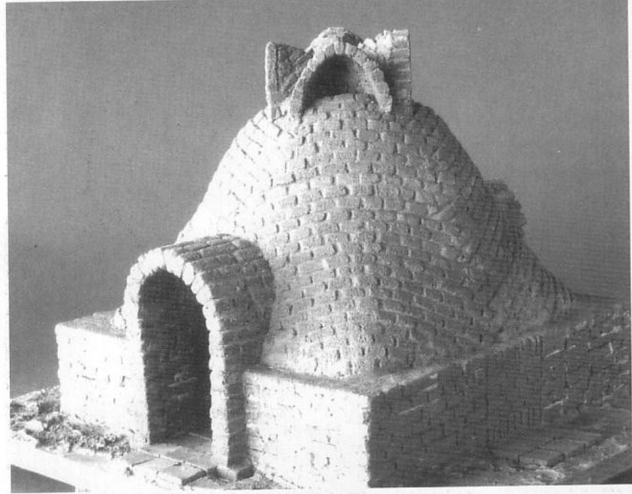

14.7-28


14.7-29


14.7-30



14.7-31

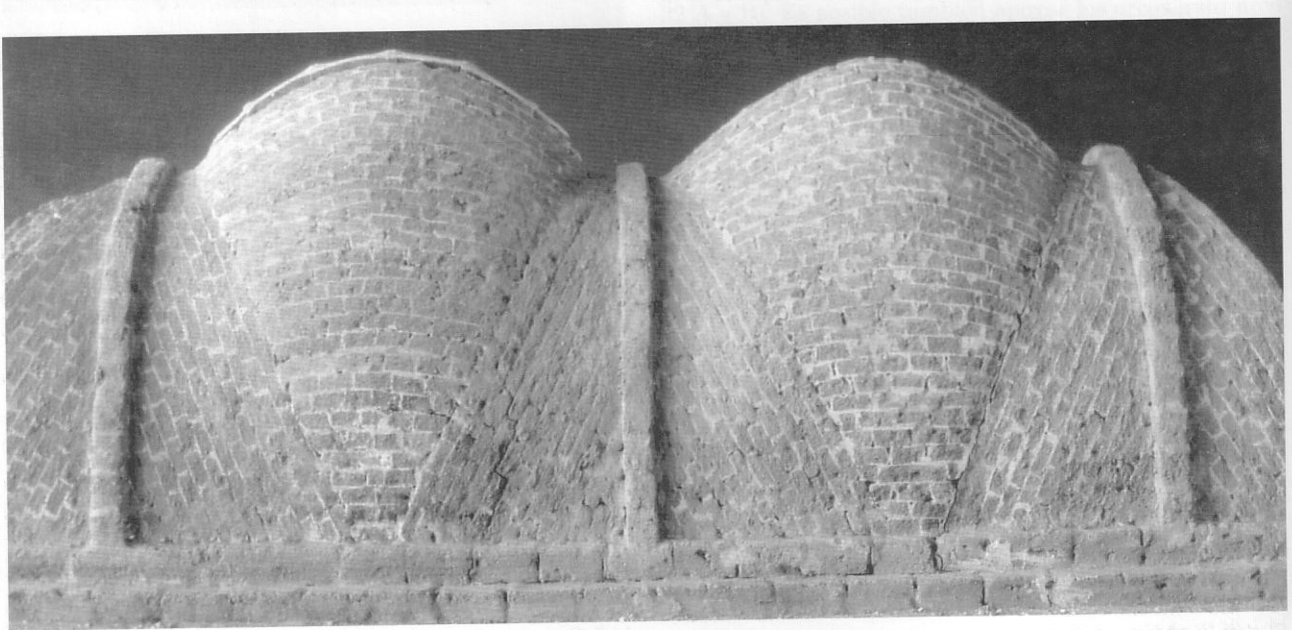


14.7-33 Cúpula persa con captadores de viento

horizontal. La Fig. 14.7-26, 14.7-27 y 14.7-28 muestran el proceso constructivo de una cúpula para techar un espacio de 4 x 4 m que puede ser construida en medio día por 5 a 6 personas.
En esta técnica los adobes que forman el arco deben tocarse en la base y requieren una cuña en la parte superior (ver Fig. 14.7-28). Debido a que este método permite que la acción del arco entre en efecto antes que se seque el mortero, los obreros pueden trabajar sobre la cúpula durante la construcción.
En el FEB se construyeron diferentes maquetas con el objetivo de mostrar que una amplia variedad de formas arquitectónicas pueden ser cubiertas con esta técnica y que además puede ser combinada con la técnica de cúpula nubica (Fig. 14.7-29 a 14.7-32).
La Fig. 14.7-33 muestra una variación de la técnica de la cúpula Afgana. En tiempos remotos esta se utilizó en Persia y por ello se le denomina técnica de cúpula Persa. En ella, los arcos inclinados parten de los 4 esquinas de la base. En este ejemplo se integraron captadores de viento a la cúpula.

14.7.6 Cúpulas nubicas

La técnica de la cúpula nubica se conoce en Egipto hace miles de años. En esta técnica se colocan hiladas circunferenciales de adobes utilizando una guía móvil (Fig. 14.7-34).
Con esta técnica los bloques se colocan de canto, evitando el deslizamiento de los bloques recién colocados. Sin embargo requiere el uso de bloques especiales en forma de cuña después de un cierto número de adobes (Fig. 14.7-35). Debido a la gran exigencia de trabajo requerida usualmente las cúpulas se construyeron sin rotar los adobes es decir colocándolos radialmente. La mayor desven-

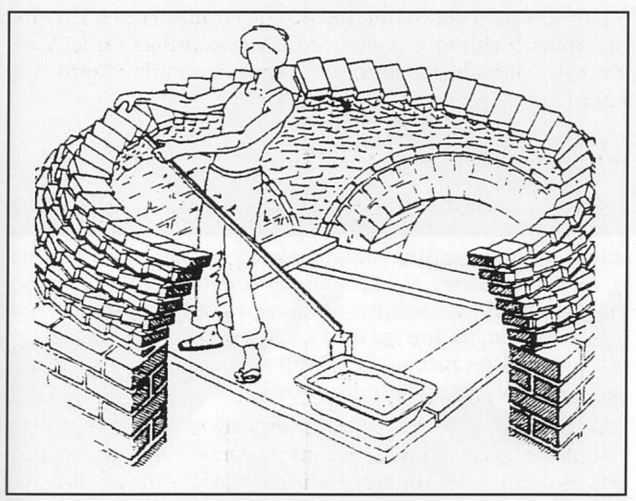


14.7-32 Cúpula persa combinada con cúpula nubica combinada

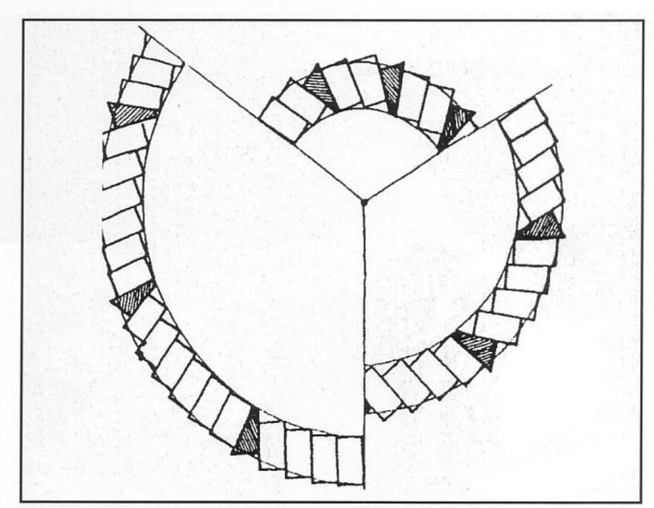
taja es que con esta técnica solo se pueden ejecutar cúpulas esféricas. En la sección 14.7.3 se explicó que en las cúpulas esféricas ocurren fuerzas circulares de tracción en la parte inferior. Por eso cuando se cubren luces mayores se deben colocar adicionalmente tensores de acero o encadenados de hormigón armado u otros elementos de retención.
Si esto no se considera la cúpula puede tener problemas estructurales como ha ocurrido en la práctica.
El grupo Development Workshop, Lauzerte, Francia, construyo varias residencias, oficinas y edificios públicos en Nigeria utilizando una versión modificada de la técnica que se muestra en la Fig. 14.7-36. En ella en vez de la guía rotatoria montada en el centro se utiliza una guía rotatoria excéntrica. La forma generada puede ser tal que las fuerzas de tracción en la parte inferior se anulen. Sin embargo las fuerzas de compresión que se crean pueden causar problemas si se hacen aberturas grandes para puertas o ventanas.

14.7.7 Cúpulas estructuralmente optimizadas

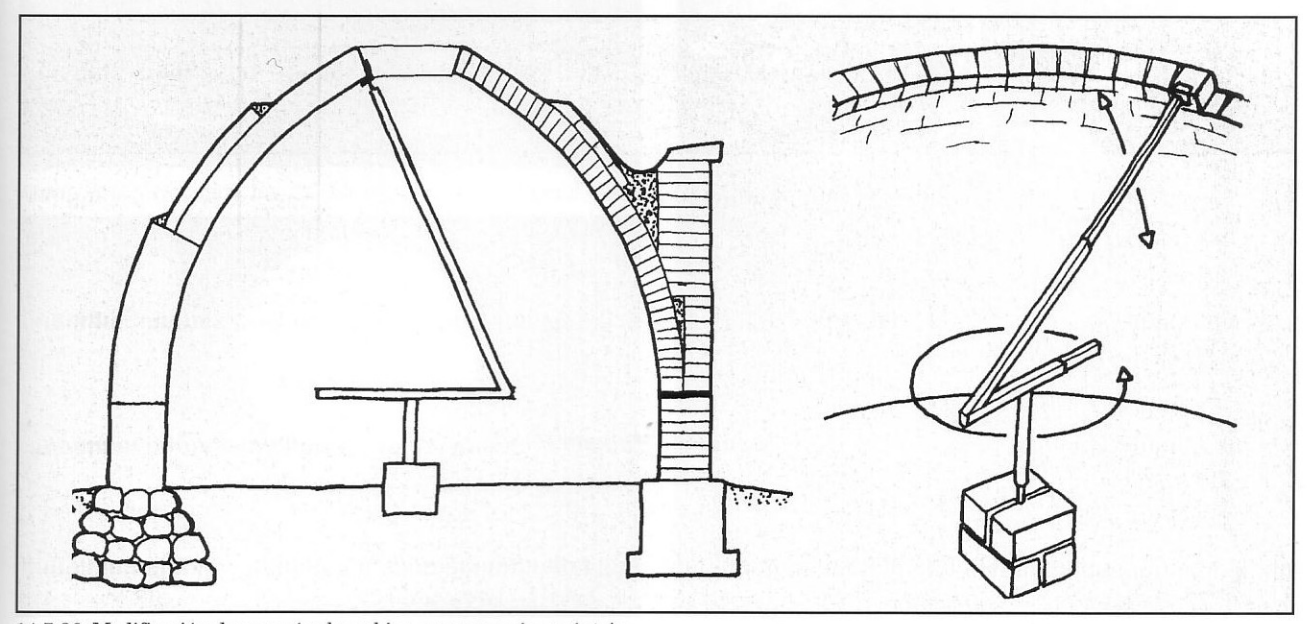
Con el objetivo de evitar las desventajas de la técnica de la cúpula nubica (sección 14.7.6), se desarrollo en el FEB una nueva técnica utilizando una guía rotatoria. Con esta técnica se puede obtener una geometría estructuralmente óptima sin empleo de encofrado. Esta geometría evita todas las fuerzas de anillo a tracción y a compresión. La derivación de esta forma se describe en la sección 14.7.3.
La guía rotatoria tiene un ángulo recto con el que se colocan los bloques. Este ángulo puede ser movido en una sec-



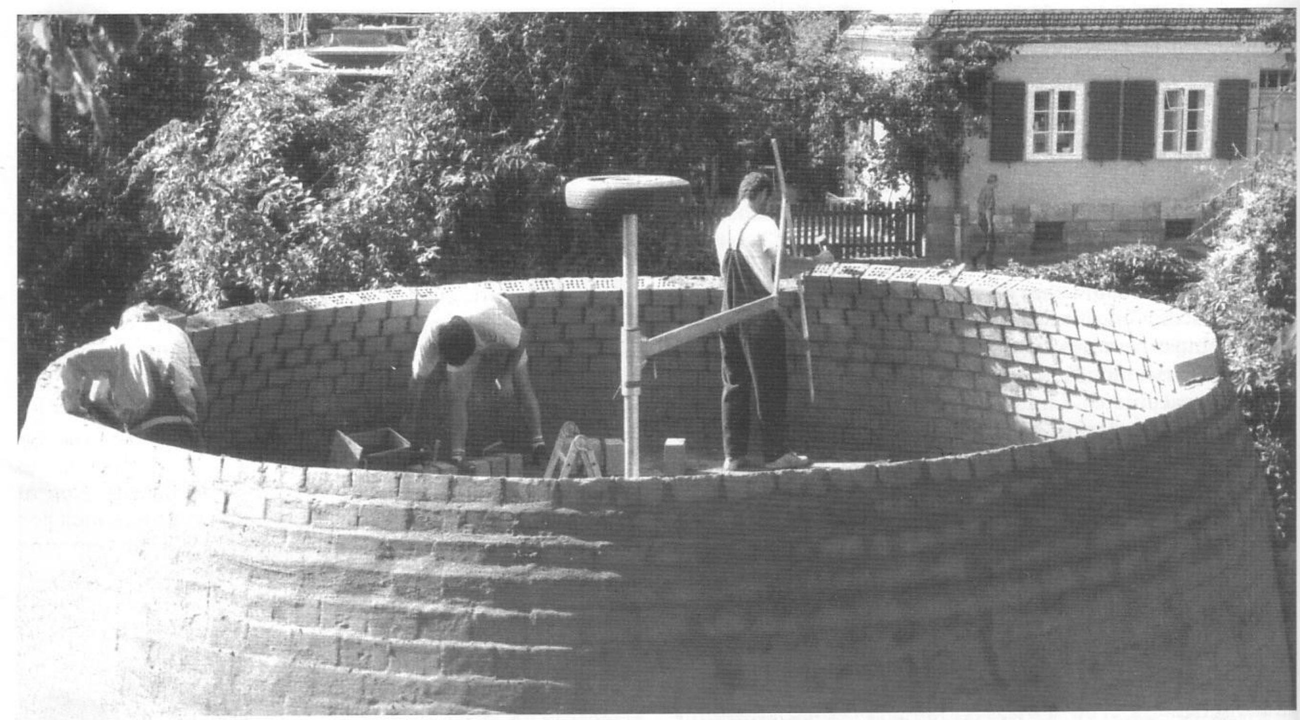
14.7-34 Cúpulas nubicas (CRAterre, 1979)



14.7-35 Cúpulas nubicas (CRAterre, 1979)



14.7-36 Modificación de una cúpula nubica con una guía excéntrica



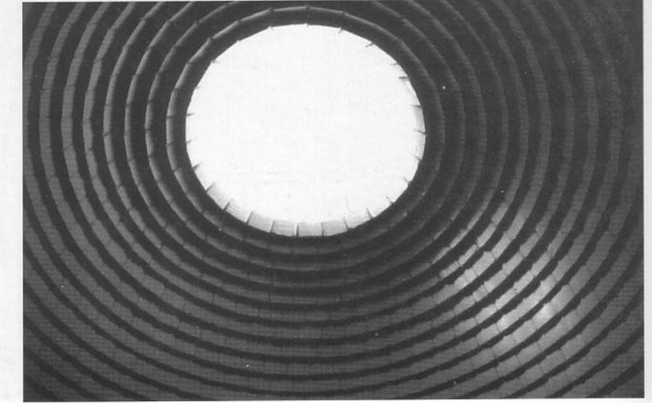
14.7-37



14.7-38



14.7-39



14.7-37 to 14.7-40 Cúpula prototipo, FEB, Universidad de Kassel

ción T curva de metal. Esta sección T está fijada a un brazo rotatorio que a su vez está fijado a un poste vertical. Las Figs. 14.7-37 a 14.7-40 muestran la aplicación de esta técnica para una cúpula de 7 m de luz libre y 6 m de altura libre que se construyo en la Universidad de Kassel, Alemania en 1992.
El lucernario superior se cubrió con una pirámide de 16 caras. El espesor de la cúpula es de solo 20 cm y la sección transversal se obtuvo utilizando un programa de computadora para obtener la forma óptima sin fuerzas de anillo como se describen en la sección 14.7.3. Para evitar el deslizamiento de los adobes de las capas superiores, las hiladas no son exactamente perpendiculares a la superficie de la cúpula sino ligeramente inclinadas de manera tal que la hilada superior tenga 20° menos de inclinación. Esto produce adicionalmente una ventaja acústica ya que no ocurre el efecto focalizador del sonido (ver Fig. 14.7-40)

14.7.8 Cúpulas y bóvedas con encofrado

Se requiere de mucho trabajo y material para construir encofrados para bóvedas y cúpulas. Por ello, casi todas las técnicas históricas los evitan.
Para construir bóvedas es mucho más sencillo hacer un molde debido a que este solo tiene una superficie curvada en una dirección. Se puede además utilizar solo un molde pequeño que recorra a medida que la construcción de la bóveda avance. Esta técnica se emplea comúnmente para construir bóvedas para piso como las que se pueden ver en Fig. 14.3-6. Las bóvedas que se muestran en la Fig. 14.7-41 y 14.7-42 se construyeron con un encofrado hecho con listones delgados colocados debajo de las juntas de los bloques de tierra. Estos bloques se colocaron sin mortero. Las juntas se humedecieron y posteriormente se rellenaron con mortero desde arriba.

14.7.9 Quemado de cúpulas de barro

El arquitecto persa Nader Khalili ha construido cúpulas de adobes en Irán y Estados Unidos que después de la construcción fueron quemadas por dentro. La combinación de los elementos: tierra, agua, aire y fuego utilizados para crear estos espacios les da un toque místico, pero tiene muchas desventajas. El quemado de los troncos y ramas genera contaminación y consume gran cantidad de energía. El proceso de quemado no puede ser totalmente controlado y por ello no resulta óptimo. El calentamiento desigual de los adobes produce grietas y reduce la estabilidad estructural.
Asimismo, al quemar los adobes se cierran la mayoría de los poros de tal manera que la capacidad del material de absorber y desorber humedad se ve drásticamente reducida (ver sección 1.4.4).

14.7.10 Ejemplos modernos

En esta sección se describen tres edificaciones cuya apariencia general está caracterizada por cúpulas y bóvedas. Otros se describen con más detalle en el capítulo 16.

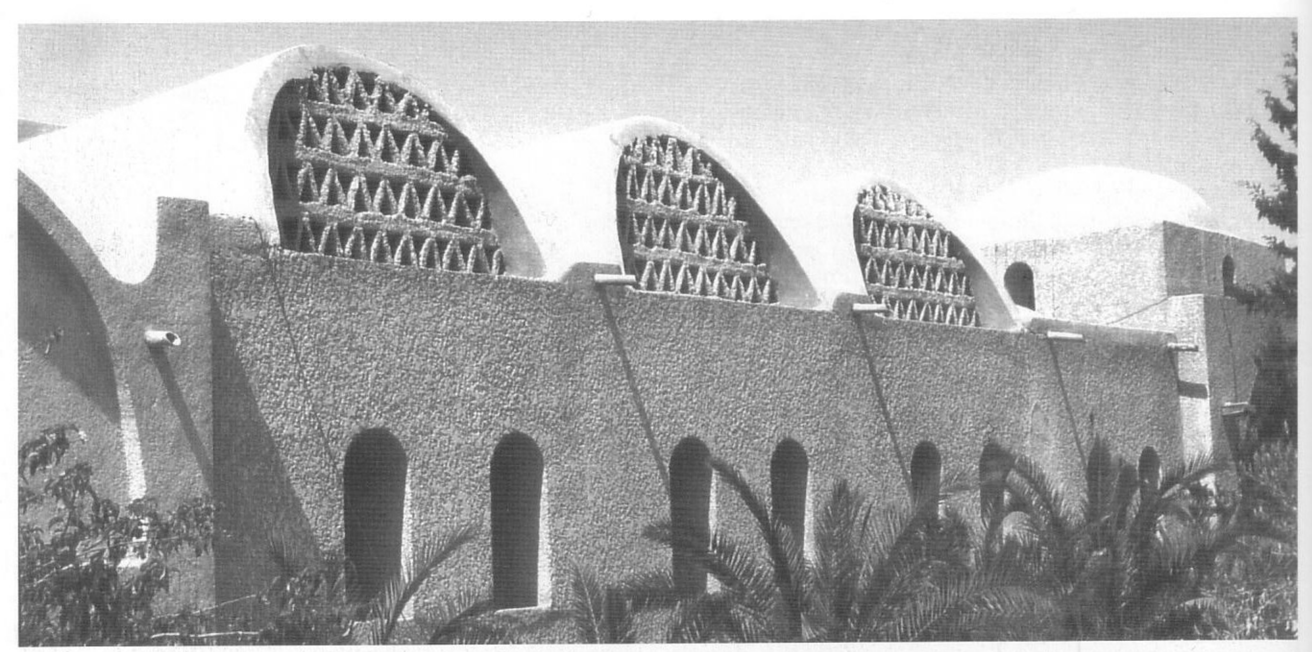




14.7-41, 14.7-42 Bóvedas con encofrado minimizado



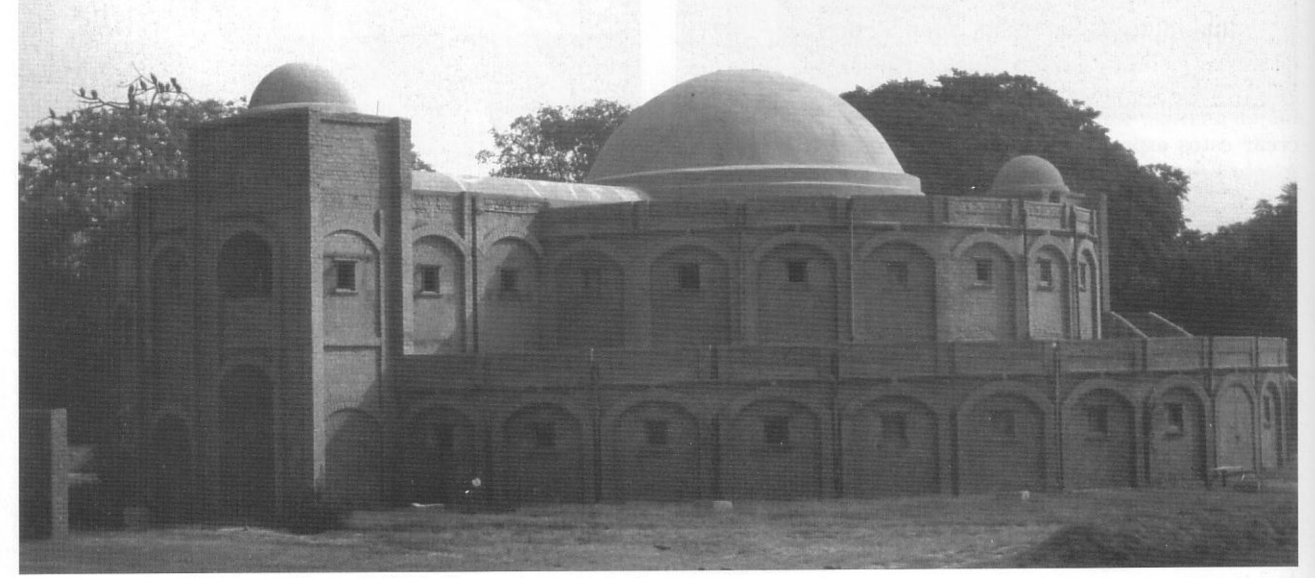
14.7-43 Cúpula con encofrado de arena húmeda



14.7-44 Instituto de investigaciones del desierto, Egipto

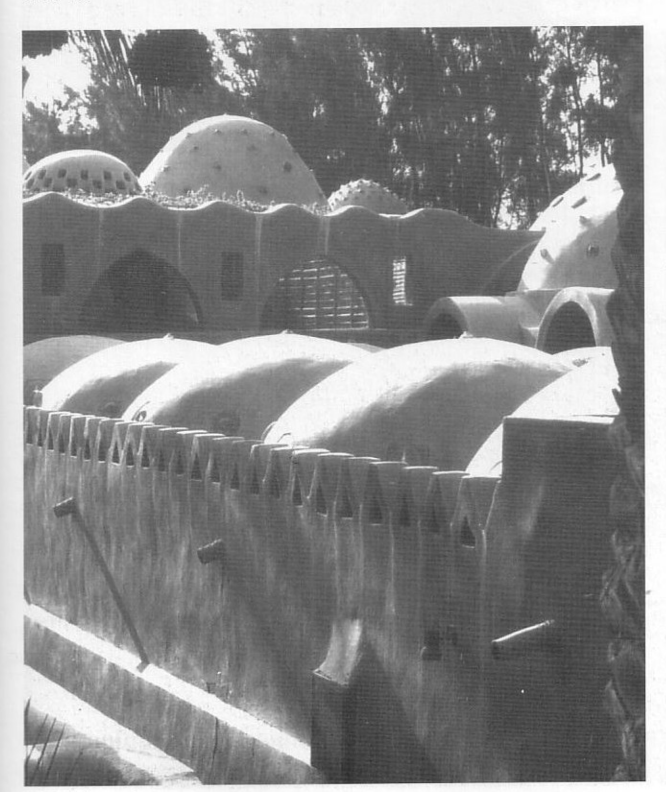
El edificio que se muestra en la Fig. 14.7-44, diseñado por Hassan Fathy, es el Instituto de Investigaciones del Desierto de la Universidad Americana del Cairo, construido en Sadat, Egipto en 1979. Todos los espacios y corredores están cubiertos por cúpulas o bóvedas nubicas. Los muros se construyeron con adobes y fueron revocados con cal.
Las cúpulas se revocaron con barro y se cubrieron con una pintura bituminosa y tienen un acabado de mortero de cal-cemento.

En Nueva Delhi se construyó en 1990 una Galería de exhibición del Centro Nacional de Artes Indira Gandhi (Arquitecto: Sanyay Prakash) ver Fig.14.7-45. Sus muros y cúpulas se construyeron con bloques de suelo. La cúpula central tiene una luz libre de 9,2 m. El edificio fue creado para ser una estructura temporal solo con el propósito de una exhibición pero aún está en uso.
Las figuras 14.7-46 a 48 muestran las cúpulas y bóvedas del centro Wissa Wassef en Cairo, Egipto.

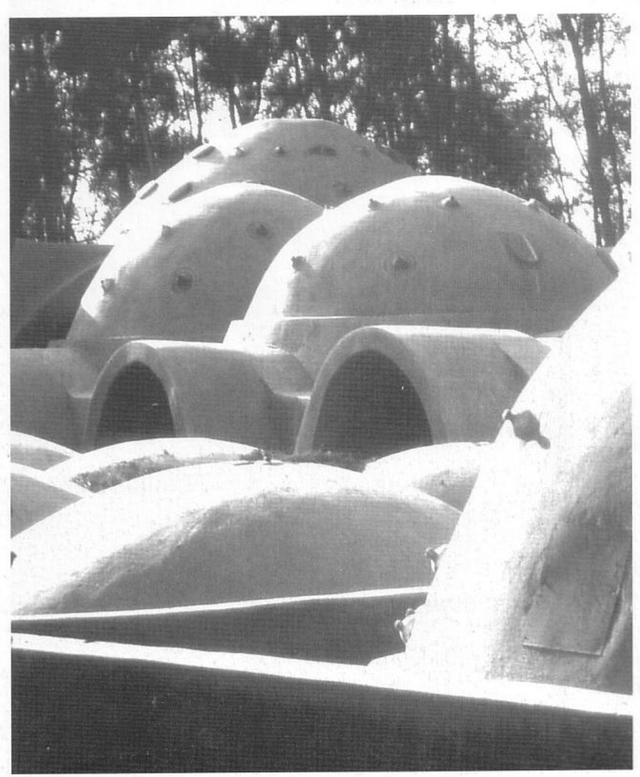


14.7-45 Sala de exhibiciones, Nueva Delhi, India

14.7-46



14.7-47

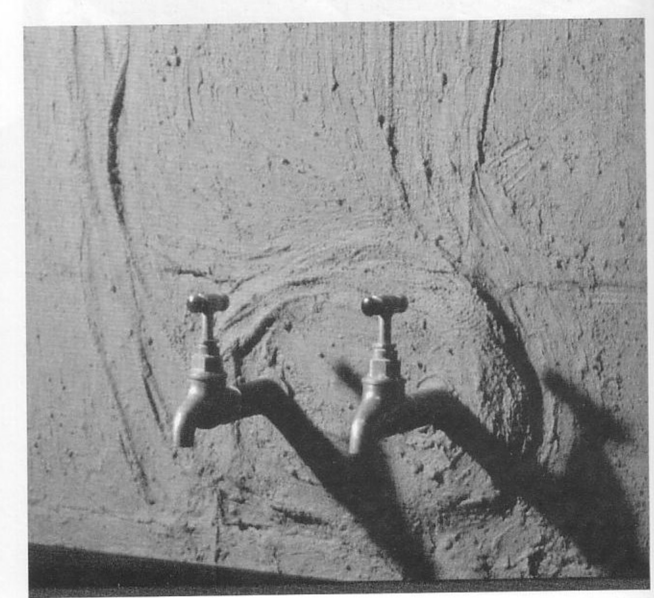


14.7-46 a 14.7-48 Centro Wissa Wassef, Cairo, Egipto

14.8-1 Muro de almacenamiento térmico en un invernadero



14.8-2 Colocación de panes de barro



14.9-1 Empapelado de barro

14.8 Muro de almacenamiento térmico

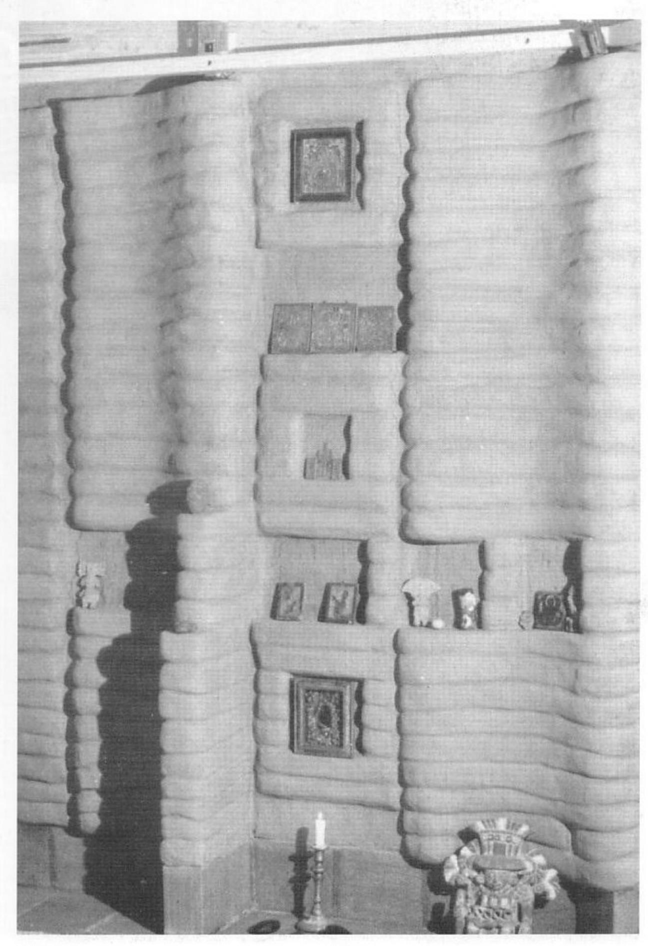
Con el objetivo de aumentar la capacidad de almacenamiento térmico y el efecto de balance de humedad de un invernadero de 20 m^2 de superficie que forma parte de una residencia en Kassel, Alemania se construyó un muro almacenador construido con panes de barro plástico (Fig. 14.8-1 y 14.8-2).
Los panes elaborados a mano, de 20 x 14 cm fueron colocados sin mortero y sin rellenar las juntas, haciendo así doble la superficie de barro activa para el almacenamiento térmico y la absorción y desorción de humedad. La superficie del muro sobre la abertura acristalada, Fig. 14.8-1, se cubrió con bolas de barro lanzadas como se describe en la sección 11.7.

14.9 Utilización de barro en baños

La aseveración de que un baño acabado con barro es más higiénico que uno acabado con azulejo deja atónitos a muchos. Experiencias acumuladas durante años con baños en los que los muros son de barro así como investigaciones científicas relacionadas a la absorción y desorción de humedad comprueban esta aseveración.
En climas templados los espejos en un baño recubierto de piso a techo con azulejo se empañan normalmente después de una ducha caliente. El espejo se desempaña luego de 30 o 60 minutos después de la ducha con las ventanas y la puerta cerradas. En contraste en un baño con muros de barro el espejo se desempaña en condiciones similares en 3 a 6 minutos. Esto se debe a que los muros de barro absorben la humedad del espacio cuando la humedad relativa es mayor de 50% y la desorben luego cuando esta baja por debajo del 50% (ver también sección 1.4.4).
Ya que la humedad se reduce rápidamente en los baños con muros de barro, no es posible el crecimiento de hongos, mientras que en baños cubiertos de azulejo la humedad se mantiene por largos períodos debido las superficies selladas permitiendo el crecimiento de hongos en las juntas de los azulejos, especialmente en aquellas selladas con siliconas. Lo cual puede ser evitado con el uso de formaldehído en la mezcla de las juntas, aunque se debe mencionar que este químico en cancerígeno.
En un baño con muros de barro se puede instalar una ducha si las paredes no son salpicadas, ver Fig. 14.10-3. La Fig. 14.9-1 muestra un "empapelado de barro" sobre una tina de baño. Una tela de cortina vieja se embebió en una lechada de barro, se pego a la pared y después se esculpió con los dedos. Esta superficie se puede hacer impermeable al agua aplicándole un repelente al agua, aceite de linaza doblemente cocido silicato sódico líquido u otras pinturas o recubrimientos.

14.10 Construcción de mobiliario y artefactos sanitarios con barro

El muro de dormitorio que se muestra en la Fig. 14.10-2 es un muro exterior que al mismo tiempo forma un armario. Esta está construida con elementos *stranglehm* (sección 8.4). Los muros divisorios del armario actúan como contrafuertes del muro exterior. El bambú colocado durante la construcción actúa como colgador y rigidiza las muros divisorios. En otro muro externo de este dormitorio que se muestra en la Fig. 14.10-1, se abrieron nichos y cavidades en el muro de *stranglehm,* para la colocación de artefactos personales.
Los estantes se pueden fijar fácilmente entre muros de *stranglehm* (sección 8.4) o de mangueras rellenas con barro alivianado (sección 10.8). La Fig. 14.10-4 muestra el espejo y los estantes en los baños integrados a la pared. En el segundo ejemplo se integro un espejo en la pared. La Fig. 14.10-3 muestra un baño en el cual la ducha central, el macetero adyacente y la bañera están revestidos con mangueras de barro.
Incluso los lavamanos pueden construirse con barro crudo. El que se muestra en la Fig.14.10.5 se construyó con barro de una distribución granulométrica optimizada que da un mínimo de retracción y se impermeabilizó añadiéndole 1% de repelente al agua a la mezcla y la superficie se pintó con el mismo repelente.
Las partes esculpidas sobre el lavamanos sirven como jaboneras o pequeñas repisas para cepillos y pastas dentales, una lámpara integrada y un espejo formados todos con

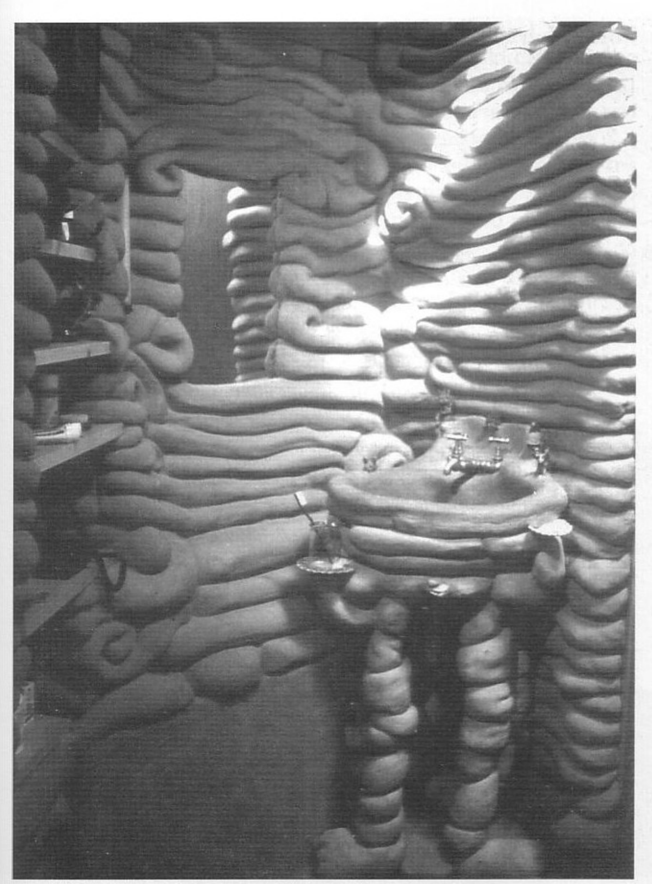


14.10-1 Muro esculpido de *stranglehm*

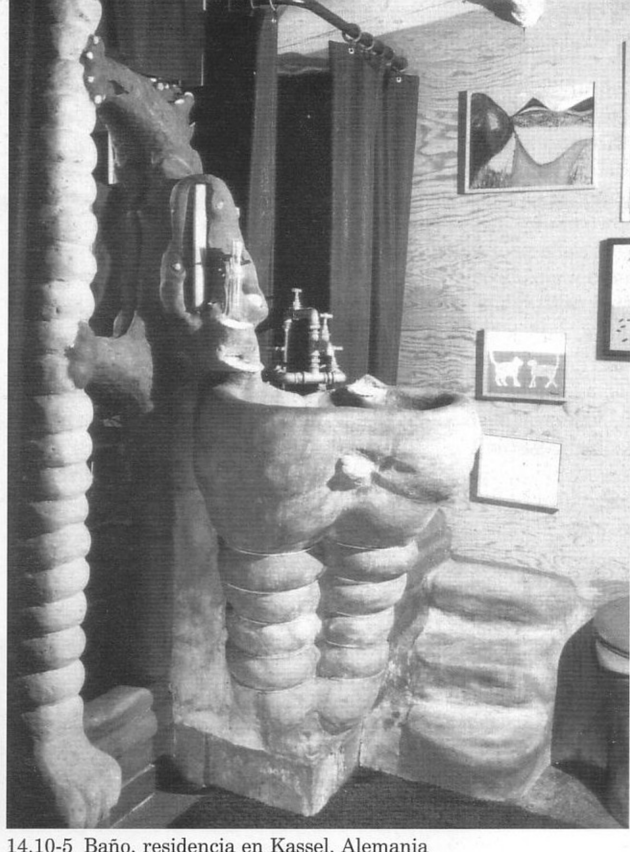
14.10-2 Dormitorio



14.10-3 Objetos sanitarios recubiertos con mangueras rellenas con barro



14.10-4 Baño, residencia en Kassel, Alemania



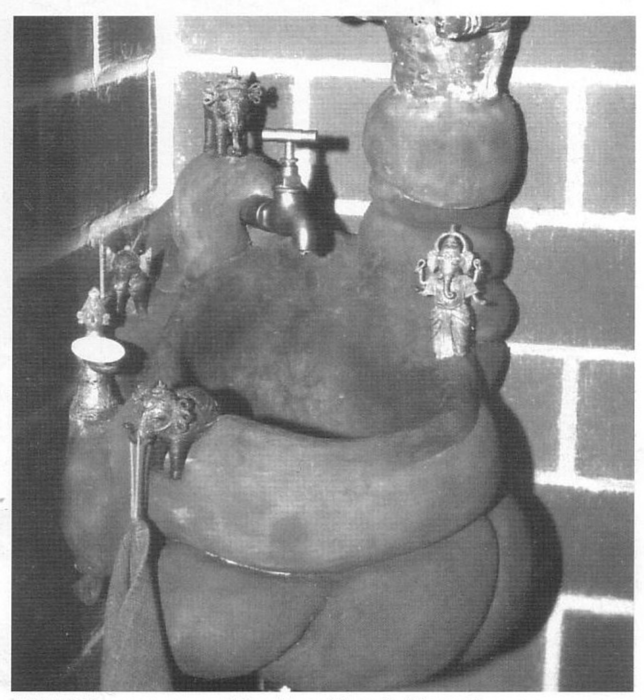
14.10-5 Baño, residencia en Kassel, Alemania

el mismo barro. El lavamanos que se muestra en la Fig. 14.10-6 está hecho con un barro arenoso altamente cohesivo en el cual se evitaron totalmente fisuras de retracción agregándole 6% de aceite de linaza doblemente cocido. Luego del secado el lavamanos se cubrió con una capa de aceite de linaza. Ambos lavamanos son impermeables y se utilizaron durante 8 años sin mostrar signos de deterioro. En el ejemplo de la Fig. 14.10-4 el barro se estabilizó con 6% de cola de caseína.

14.11 Cocinas de barro

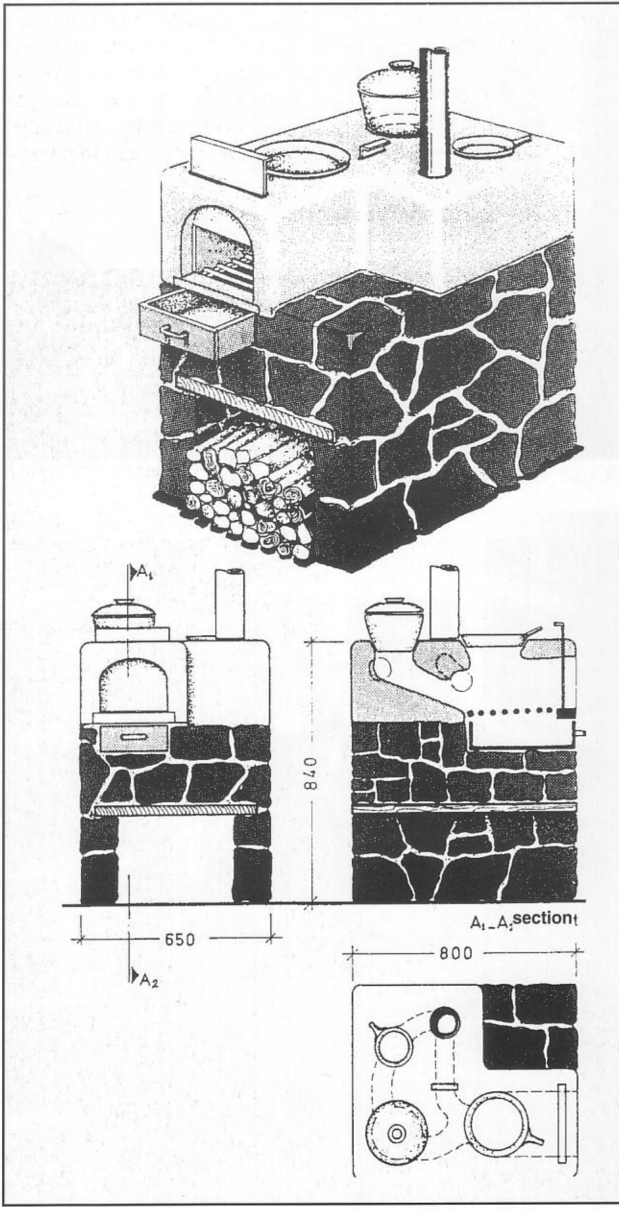
14.11.1 Cocinas ahorradoras de madera

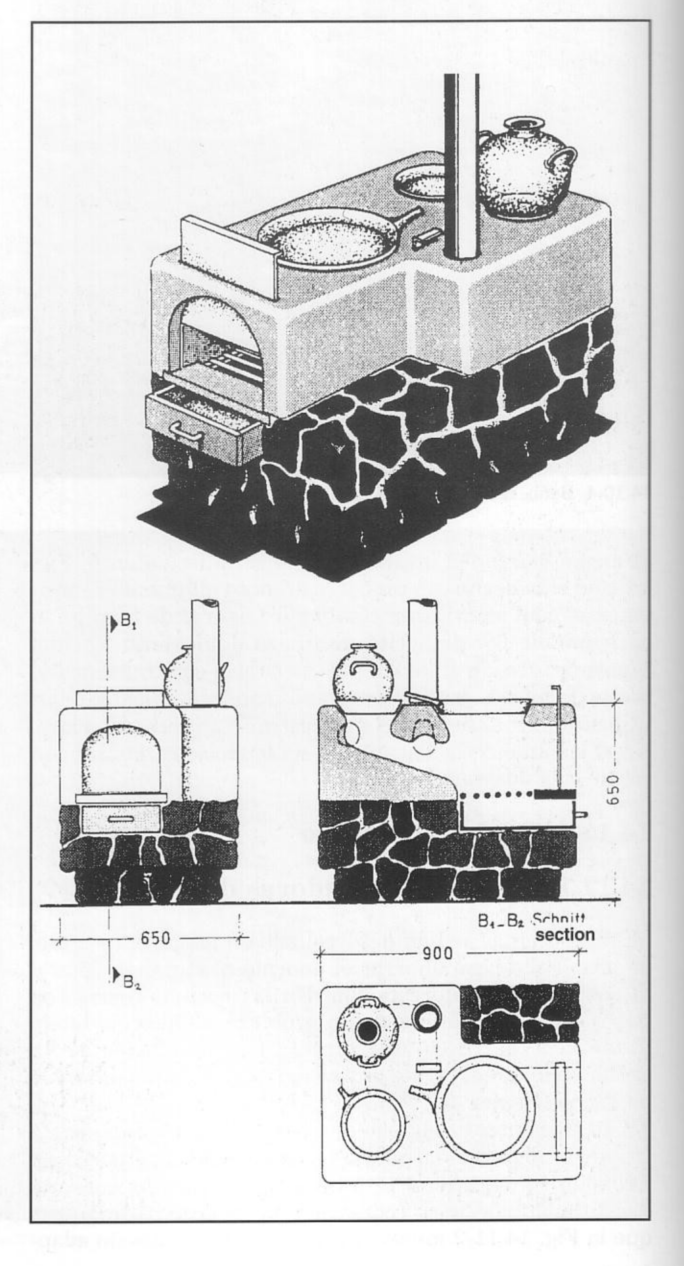
Muchas cocinas se han desarrollado en los países en vías de desarrollo para ahorrar el enorme consumo de leña y la consecuente deforestación. En las cocinas hechas de barro ocurre comúnmente un problema de diseño donde la masa de barro es muy grande y la mezcla no se ha optimizado de tal forma que se agrieta teniendo perdidas de humo (Evans, 1979).
En 1978 el autor desarrollo una cocina económica, se construyeron algunas variantes en Alemania, Guatemala y Ecuador. La Figura 14.11-1 muestra una cocina con una diseño adaptado para requerimientos europeos mientras que la Fig. 14.11-2 muestra la misma con un diseño adap-



14.10-6 Lavamanos, residencia en Kassel, Alemania

tado para las condiciones de Guatemala donde se emplea la leña más grande y una sartén llamada "comal" para hacer tortillas. Tres utensilios pueden ser calentados a la vez en esta cocina. La abertura primera se encuentra directamente sobre el fuego y se recomienda para freír, la segunda se utiliza para cocinar en general y la tercera se emplea para mantener la comida caliente.
Este sistema está provisto de un regulador de tiro antes del tubo de la chimenea. Si este se levanta una ruta directa se abre al aire de la primera cámara hasta la chimenea. Esto es útil para prender el fuego y obtener una mayor temperatura debajo de la primera abertura. Cuando el regulador de tiro se cierra el aire caliente pasa a través llegando a las tres cámaras. Con el objetivo de regular la toma de aire, en la entrada también se ubica un regulador.
La mezcla de barro tiene la siguiente composición: 10 partes de barro arenoso, 12 partes de paja, 1 parte de aserrín y 2 partes de estiércol de vaca. Con el objetivo de garantizar mayor rapidez en el secado al igual que evitar fisuras de retracción se insertaron algunas botellas y ladrillos donde se iban a perforan después las cámaras, tubos de aire y chimeneas.
El diseño se hizo de tal manera que en ningún lugar del horno el material tuviera un espesor mayor a 15 cm. Con esta mezcla y un máximo espesor de 15 cm se evitaron todas las grietas de retracción. Es importante que las





14.11-1, 14.11-2 Cocinas económicas a leña, Guatemala

aberturas donde se colocan los elementos de cocina sean lo suficientemente amplias como para que la olla encaje dentro.

14.11.2 Cocina integrada con cama

Las Figuras 14.11-3 muestra una cocina construida por el FEB. El aire caliente circula debajo de un asiento y una cama antes de pasar a la chimenea.
Todo el conjunto está construido con tierra apisonada y después tallada con un cuchillo. Solo la cámara de fuego está construida interiormente con ladrillos refractarios. Sobre esta cámara se construyo una plancha de acero donde se pueden hacer huevos y panqueques, o se pueden calentar utensilios de metal. Cuando se emplea para cocinar se abre un regulador de tiro para que el aire caliente entre de forma directa.

14.11.3 Horno para pan y pizza

La Figura 14.11-4 muestra un horno diseñado por E. Zurheide para hornear pizza y pan. Sobre un cimiento de piedra, se construyó un piso de adobe. Sobre este, se construyó un entramado de leños como una malla de baloncesto que actúa como encofrado para una cúpula de adobe que se construye para formar la cámara de horneado. Una segunda cúpula se construye sobre la primera dejando una cámara de aire. Esta ofrece aislamiento térmico y actúa como cubierta. (Zurheide, 1986).

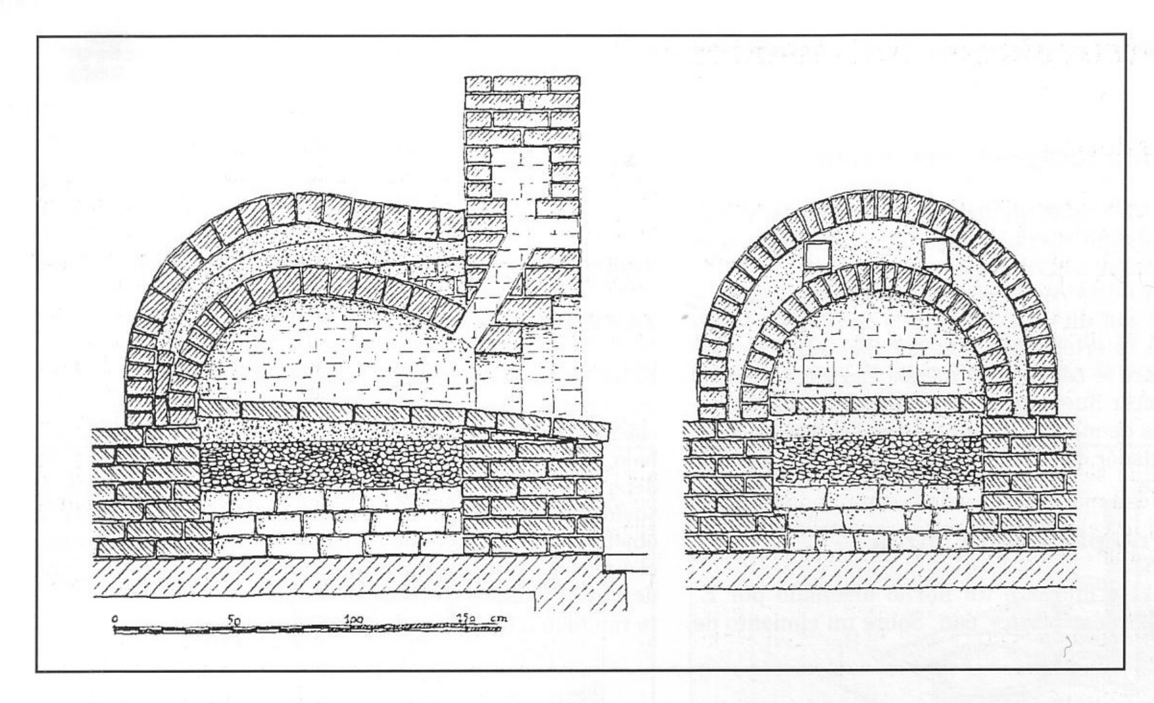
14.12 Estanques herméticos de barro

14.12.1 Generalidades

El uso de un suelo con un alto contenido de arcilla (más de 30%) para estanques herméticos es una alternativa a las clásicas membranas plásticas. Aunque requiere de más trabajo, esta solución es preferible por razones ecológicas. Se debe tener en cuenta que la capa de barro para sellar el suelo debe ser de 10 cm de espesor y sin fisuras. Con el objetivo de protegerlo de daños mecánicos provocados por el agua o los humanos se recomienda cubrirlo con una capa de cantos rodados de 10 cm de espesor. Esta capa le permite también a las raíces de plantas anclarse.



14.11-3 Cocina integrada con sistema de calefacción para una cama y un asiento



14.11-4
Horno para pan y pizza

14.12.2 Tierra apisonada

Se vierte una capa de 15 a 18 cm de espesor de suelo arcilloso y se apisona sobre un fondo previamente humedecido, obteniendo una capa de 10 a 12 cm de altura.
La compactación se puede hacer mediante pisones manuales comunes o con pisones motorizados empleados en la construcción de carreteras.
El material a compactar debe estar suficientemente húmedo para ser compactado en una capa homogénea. Sin embargo si los trabajadores caminan sobre el mismo sus pies no deben hundirse más de 1 cm en el material.

14.12.3 Ladrillos crudos

Un método más simple es colocar ladrillos crudos de tal forma que se eviten juntas grandes. Las juntas se deben rellenar con una pasta hecha con los mismos ladrillos. Luego de colocados los ladrillos se les echa agua de tal manera que se hinchen y sellen las posibles fisuras.
Un método alternativo es sumergir los ladrillos crudos en agua hasta que sus superficies se ablanden hasta una profundidad de 1 cm y luego unirlos hasta que no queden orificios.

15. Construcciones antisísmicas

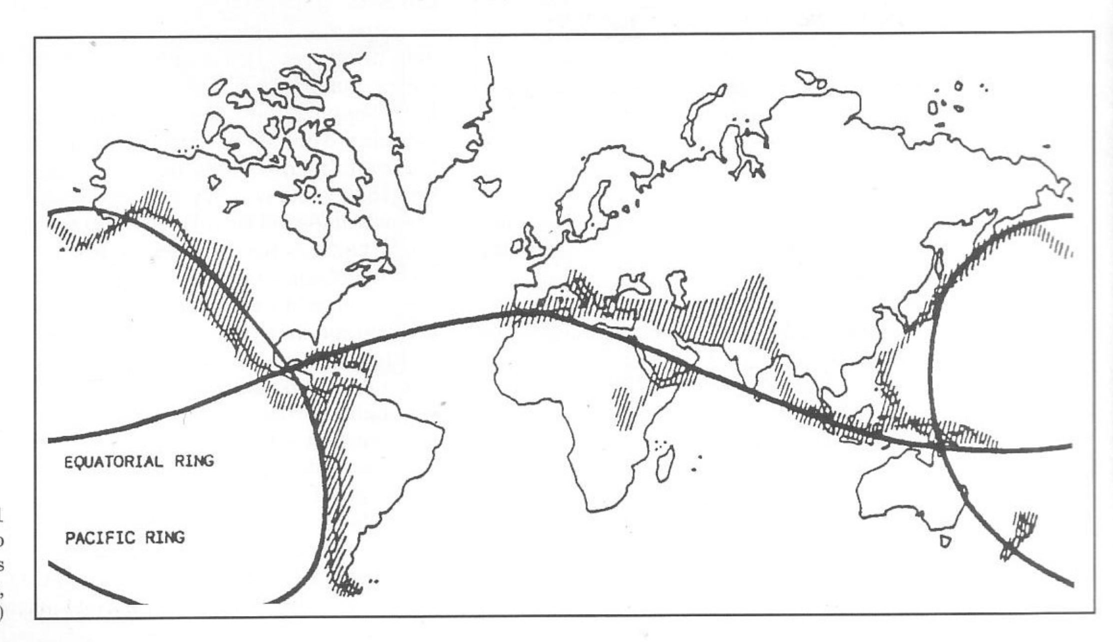
15.1 Generalidades

El sismo ocurre por el movimiento de las capas tectónicas o por actividades volcánicas.
Las áreas en el mundo que son más propensas a los sismos se muestran en la Fig. 15.1-1.
Los más fuertes se han detectado en el anillo del Pacífico a lo largo de la costa de Estados Unidos influyendo también en Nueva Zelanda, Japón y Nueva Guinea.
Otra zona afectada se encuentra a lo largo del ecuador ver Fig. 15.1-1. En Asia se detectaron sismos de una intensidad de 8 en la escala de Richter y en los Andes sismos por encima de 8,7 han sido registrados. Cerca de cien sismos con una intensidad mayor a 6 y veinte con una intensidad mayor a 7 en la escala de Richter son registrados anualmente. Muchos miles de personas son afectadas por estos cada año.
Los edificios son afectados mayormente por la aceleración horizontal creada por el movimiento de la tierra en el plano horizontal. Las aceleraciones verticales creadas por la actividad sísmica son menores al 50%.
En construcciones de uno o dos niveles el peligro consiste en que con el movimiento los muros tienden a caer hacia fuera y por lo tanto los techos o entrepisos se derrumban, una solución técnica antisísmica para construcciones hasta dos niveles busca que los muros no se abran hacia fuera y que los techos se encuentren bien arriostrados.

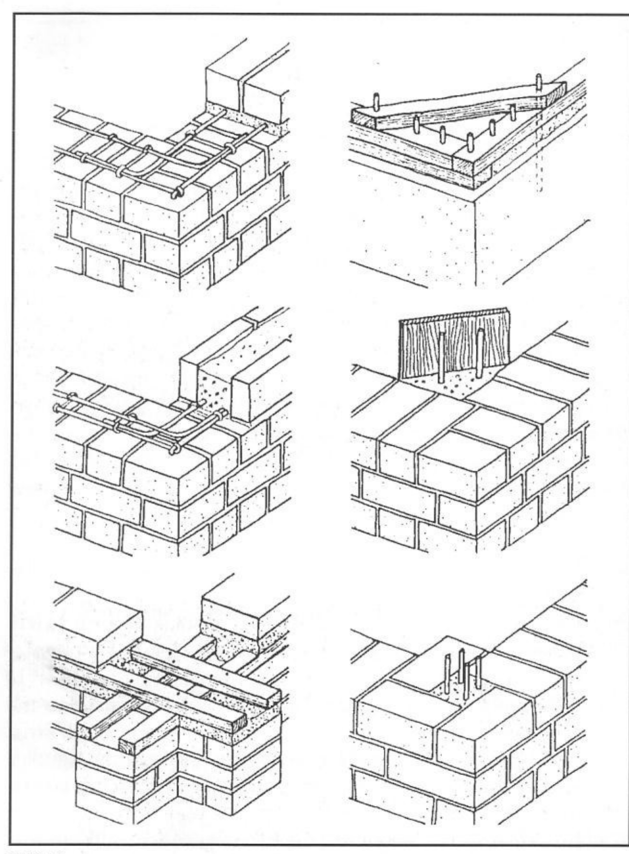
15.2 Requisitos constructivos y de diseño

Al diseñar edificios para zonas propensas a los sismos se debe considerar que las fuerzas sísmicas que actúan sobre el edificio sean proporcionales a la masa y que la deflexión se incremente significativamente sobre la altura del edificio. Por eso al diseñar edificios de dos pisos se aconseja que la planta baja sea sólida mientras que la alta sea ligera, preferentemente una estructura flexible de madera con bahareque (quincha). En cualquier caso las cubiertas pesadas con planchas, pizarras y tejas deben evitarse.
Las razones por las que los muros por lo general se derrumban es porque no tienen un encadenado (viga superior de anillo) y/o por su falta de resistencia a las fuerzas de corte o flexión. Asimismo, las aberturas de puertas y ventanas causan el debilitamiento del muro. Bajo influencia sísmica las fuerzas se concentran en las esquinas de las aberturas creando grietas. Con el objetivo de reducir el peligro del colapso se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

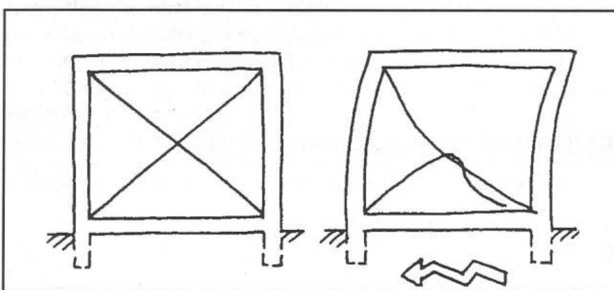
1. Las viviendas no se deben ubicar en terrenos inclinados.
2. Es ventajoso si la frecuencia de resonancia de la vivienda no es igual a la frecuencia del movimiento telúrico durante el sismo. Esto implica que las viviendas pesadas construidas con técnicas sólidas no deben ser ubicadas sobre una base de roca dura sino sobre suelos arenosos o limosos. Viviendas ligeras sin embargo se comportan mejor sobre un suelo blando.
3. Los diferentes espacios de la vivienda no deben tener diferentes niveles ni tener alturas distintas. Si así fuera, estas partes deben estar estructuralmente separadas. Debido a que las secciones de diferentes alturas tienen diferentes frecuencias de resonancia, se les debe permitir tener una la oscilación independiente.



15.1-1
Areas del mundo propensas a sismos (Houben, Guillaud, 1984)



15.2-1



15.2-2

4. La planta de la vivienda debe ser tan compacta como sea posible. Las plantas circulares dan una mejor rigidez que las cuadradas y estas mejor rigidez que las rectangulares (ver sección 15.3).
5. Los cimientos deben actuar como una cadena de anclaje rígida (viga perimetral) y por ello, deben estar adecuadamente reforzados.
6. Los cimientos, muros y techos deben estar bien fijados entre si y las juntas en condiciones de resistir las fuerzas de corte que se producen.
7. Como encuentro superior de los muros debe construirse un encadenado (viga anillo) que enlace toda la estructura.
8. Los muros deben ser estables contra las fuerzas de tracción y corte que se producen. La mampostería debe realizarse con juntas bien rellenas y morteros con buena capacidad aglutinante.
9. Los muros portantes de mampostería deben tener un espesor mínimo de 40 cm y su altura no debe ser mayor a 6 veces su espesor.
10. Los muros de mampostería deben reforzarse cada 3 a 4 m con columnas que estén fijadas estructuralmente a los cimientos (capaces de tomar momentos).
11. Las esquinas de los muros, juntas entre muros y las aberturas de ventanas deben rigidizarse con columnas verticales de madera, hormigón armado que estén fijados a los cimientos o con contrafuertes de tal manera que las fuerzas horizontales no muevan los elementos.
12. En muros hechos de tapial se recomienda la realización de los mismos en elementos con forma de T, U, Z, L evitando por su morfología el peligro que estos colapsen.
13. Se recomienda hacer las aberturas sin dintel utilizando para este propósito el encadenado superior.
14. Las cubiertas deben ser tan ligeras como sea posible. Se recomienda fijar la estructura de la cubierta a columnas dentro o fuera de los muros, de tal manera que ante fuerzas sísmicas su movimiento sea independiente al de los muros.
15. Los empujes horizontales de bóvedas y cúpulas deben estar suficientemente asegurados con encadenados, contrafuertes o tirantes.

La Fig. 15.2-1 muestra vías posibles de estabilización de muros de mampostería con la aplicación de un encadenado (viga de anillo) y columnas de traba. Existen dos métodos constructivos para diseñar construcciones antisísmicas.

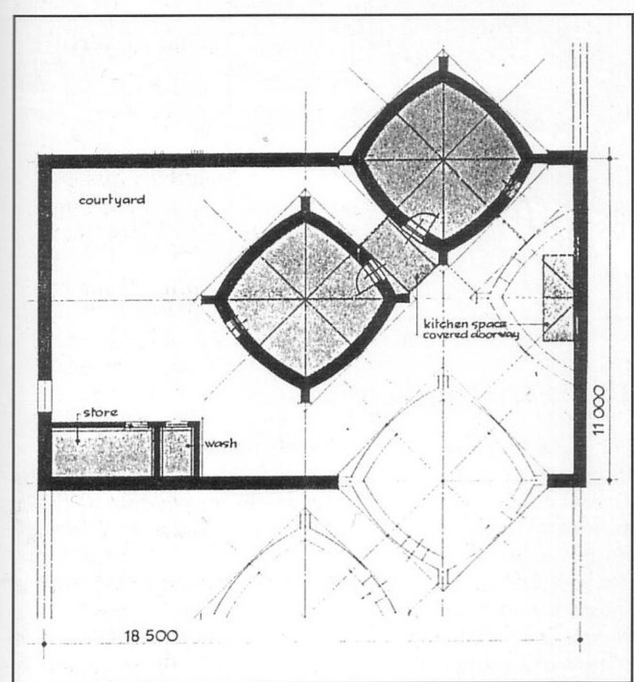
El primer método y el más común es el de construir muros y cubiertas al igual que sus juntas tan fuertes que no puedan romperse ni deformarse bajo cargas sísmicas. El segundo método es permitirle a la estructura del edificio ser elástica de tal manera que la energía cinética del impacto sísmico se disipe por la deformación del edificio. Esta es la solución más inteligente, especialmente debido a que se requiere menos material y esfuerzo.

Por ejemplo, si un muro vertical con una estructura de esqueleto estabilizada con tensores diagonales es impactada horizontalmente desde la derecha como se muestra en la Fig. 15.2-2 ocurrirá una concentración de tensiones en ambos extremos del tirante que sale del la base izquierda hacia la parte superior derecha provocando fisuras o rompiendo definitivamente la diagonal.

Por eso el debilitamiento ocurre primero en aquellas uniones que son más propensas a fallar en el muro. Sin embargo con una estructura elástica sin diagonales las esquinas están en condiciones de tomar algunos momentos ningún elemento estructural está sobrecargado y por eso ocurre la deformación sin llevar al colapso del muro. Obviamente en el segundo caso el relleno de la estructura debe ser también algo flexible. Por eso muros construidos con la técnica del bahareque en la cual existe una malla horizontal y vertical de componentes, revocados con barro son menos propensas a los daños que los muros de mampostería. La Figura 15.2-3 muestra una casa en Guatemala afectada por



15.3-1



15.3-4 Viviendas de adobe antisismicas, Afganistán, (Sibtain, 1982)



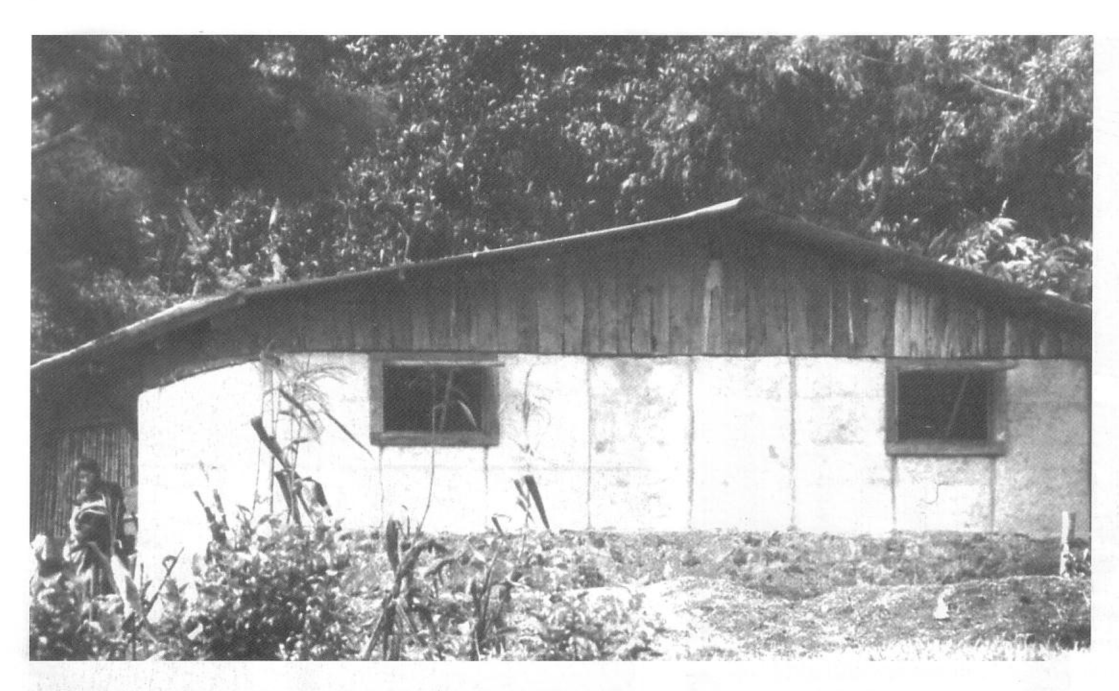
15.2-3 Vivienda de bahareque después de un sismo fuerte, Guatemala



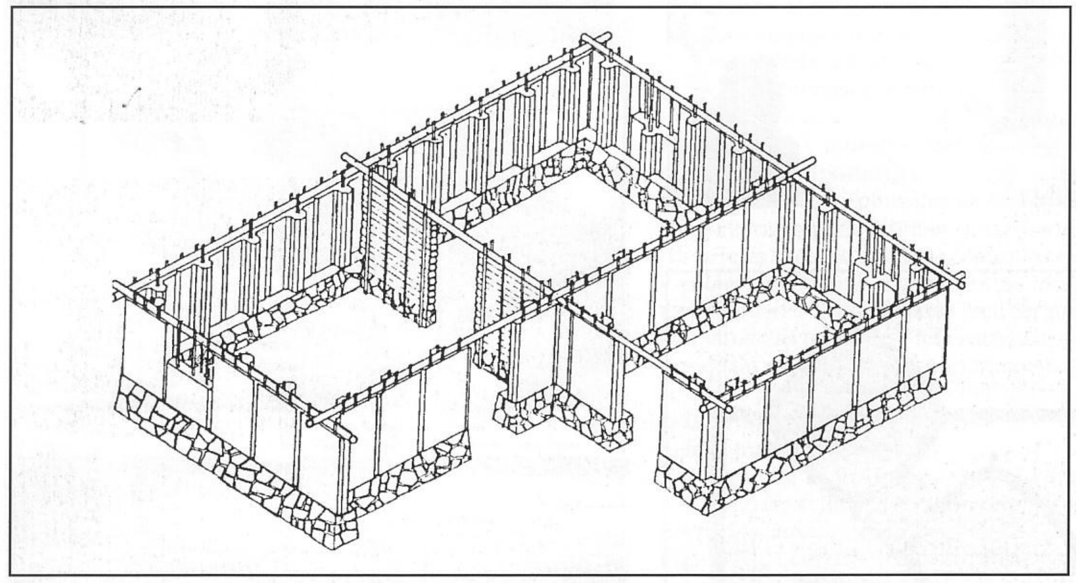
15.3-2



15.3-1 a 15.3-3 Ensayos con modelos de viviendas antisismicas de tapial



15.4-1



15.4-2

un sismo que pudo resistir las fuerzas debido a su flexibilidad. De todas maneras hubiera sido ventajoso para esta construcción tener columnas de traba unidas a la cimentación y pequeñas diagonales en las esquinas superiores como tienen las casas alemanas de entramado *(Fachwerk)*.

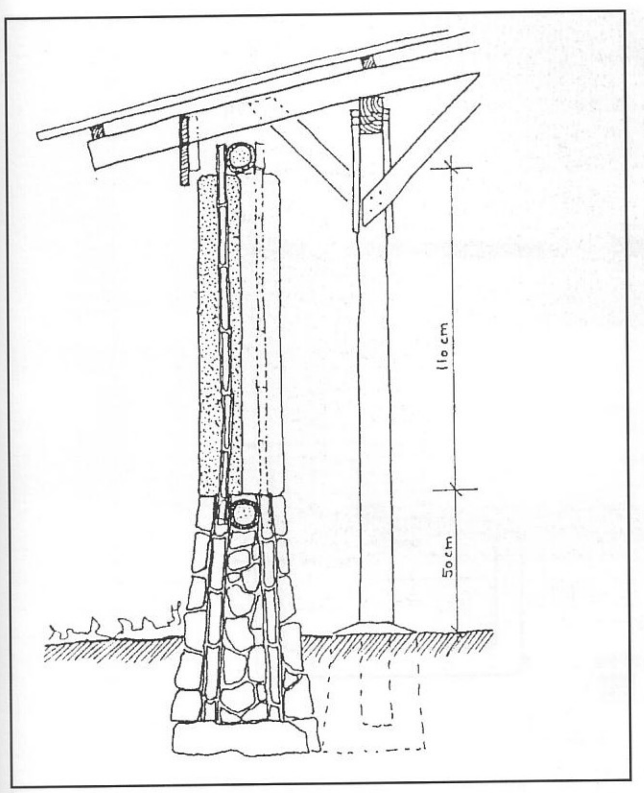
La Fig. 15.2-4 muestran fisuras típicas provocadas por sismos en construcciones de mampostería estas siempre aparecen primero en las esquinas de las ventanas o dinteles de puertas.

Experiencias hechas en maquetas lograron comprobar que la distancia entre la puerta y la ventana era demasiado pequeña y que el dintel no poseía una buena unión con el muro.

15.3 Forma de la planta

Un método simple de simular el impacto de un sismo se demostró en una tesis de doctorado en la Universidad de Kassel donde un peso de 40 kg. sobre un péndulo de 5,5 m de longitud se dejó oscilar y golpear modelos de viviendas antisismicas (Fig. 15.3-1). Estudios comparativos se hicieron con una planta cuadrada y una circular mostrando la mayor estabilidad de esta última.

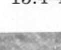
Luego de cuatro golpes dos de los muros del modelo con la planta cuadrada colapsaron (Fig. 15.3-2), mientras que el modelo con la planta circular no colapsó incluso hasta después de siete golpes (Fig. 15.3-3) (Yazdani, 1985).



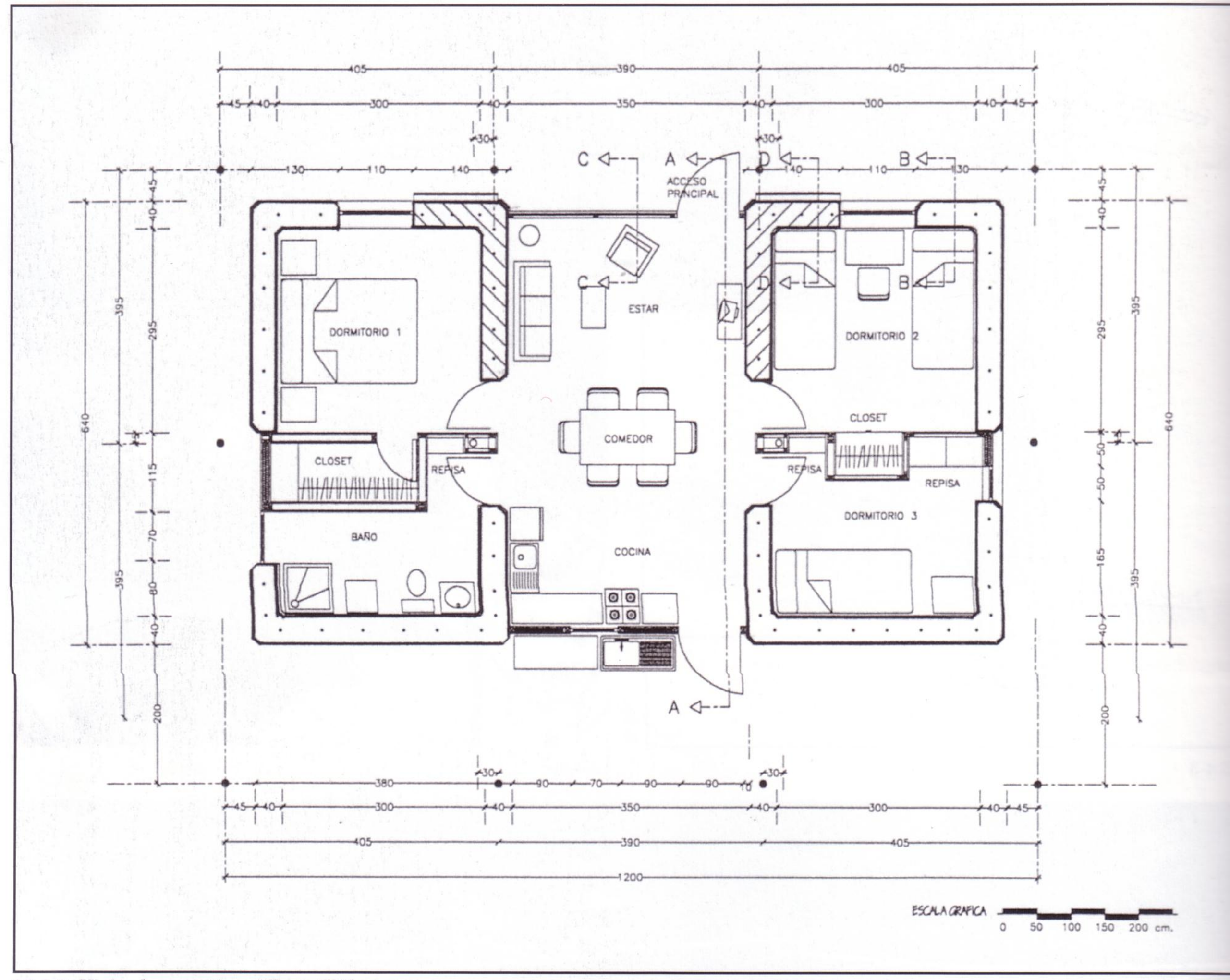
15.4-3



15.4-4



15.4-1 a 15.4-5 Prototipo para una vivienda de bajo costo con muros de tapial reforzado con bambú, Guatemala, 1978



15.4-6 Vivienda prototipo, Alhué, Chile

Syed Sibtain construyó muchas viviendas antisismicas en Afganistán utilizando muros convexos reforzados con contrafuertes en las esquinas (Fig. 15.3-4). La estabilidad alcanzada con este diseño, es tan buena como la alcanzada con plantas circulares (Sibtain, 1982).

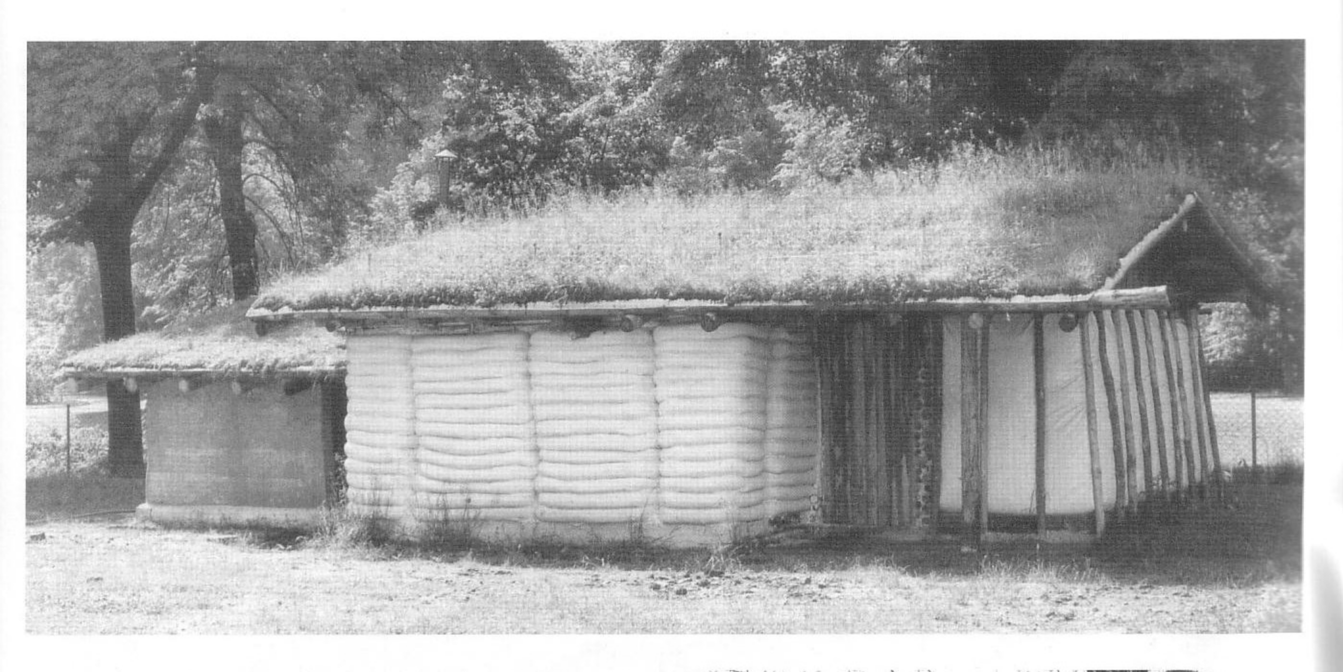
15.4 Muros de tapial reforzados con bambú

Una técnica de paneles de tapial reforzados con bambú se desarrollo en 1978 como parte de un proyecto de investigación en el FEB, y se implemento exitosamente con la Universidad de Francisco Marroquin (UFM) y el Centro de Tecnología Apropiada (CEMAT), ambos en Guatemala (Figs. 15.4-1 a 15.4-5).

En este proyecto se construyeron elementos de tapial reforzados con bambú de 80 cm de largo y de un piso de altura utilizando un encofrado de metal en forma de T de 80 cm de largo, 40 cm de altura y 14 a 30 cm de espesor (Fig. 15.4-4). La estabilidad de los elementos se obtuvo con 4 varillas de bambú de 2 a 3 cm de espesor y la sección T. Estos elementos se fijaron en la base a un encadenado de bambú dentro de un zócalo de mampostería de piedra y en la parte superior a un encadenado de bambú rectangular. Debido a la nervadura integrada al elemento, este tiene aproximadamente cuatro veces más resistencia a las fuerzas horizontales que un muro de 14 cm de espesor. Luego del secado aparecieron grietas verticales de 2 cm de espesor entre los elementos. Estas se rellenaron posteriormente con barro y actúan como juntas de fallo prediseñadas permitiendo un movimiento independiente a cada elemento durante el sismo.

Esto significa que estas juntas pueden abrirse y toda la estructura se deforma (disipando la energía cinética sísmica) sin que la unidad del muro se quiebre o colapse. Las columnas sobre las que descansa la cubierta se ubicaron a 50 cm del muro hacia adentro. (Fig. 15.4-3) de manera tal que la estructura de la cubierta fuera independiente del sistema de muros.

La superficie de tapial no se revoco solo se alisó con una llana y luego se pintó con una mezcla de 1 bolsa de cal hi-

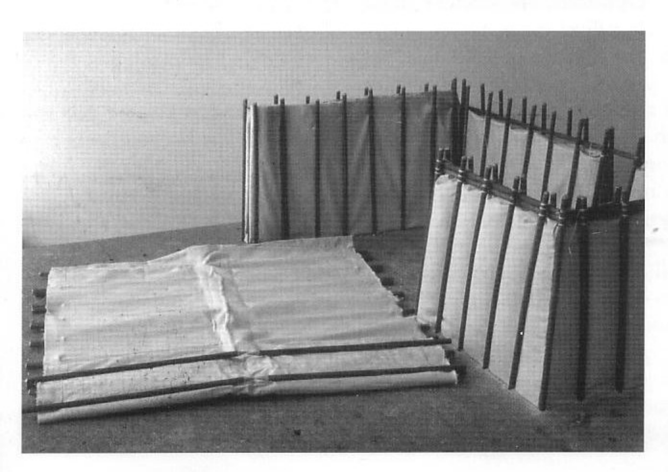


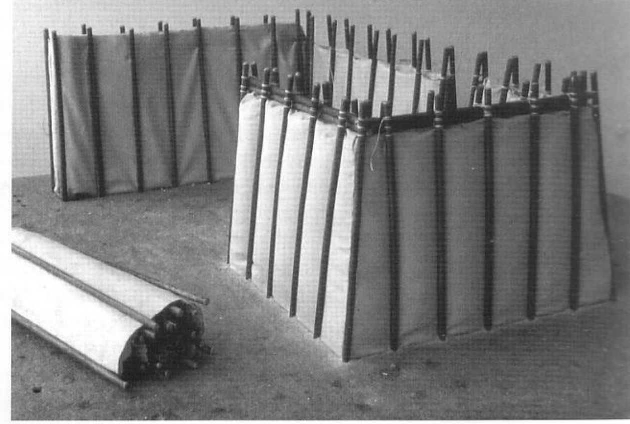
15.5-1 Prototipo de una vivienda de bajo costo, FEB, 1878

15.5-2 Muro de mangueras rellenas de barro

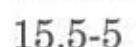
15.5-3, 15.5-4 Elementos textiles prefabricados para muros, con relleno de barro, maqueta



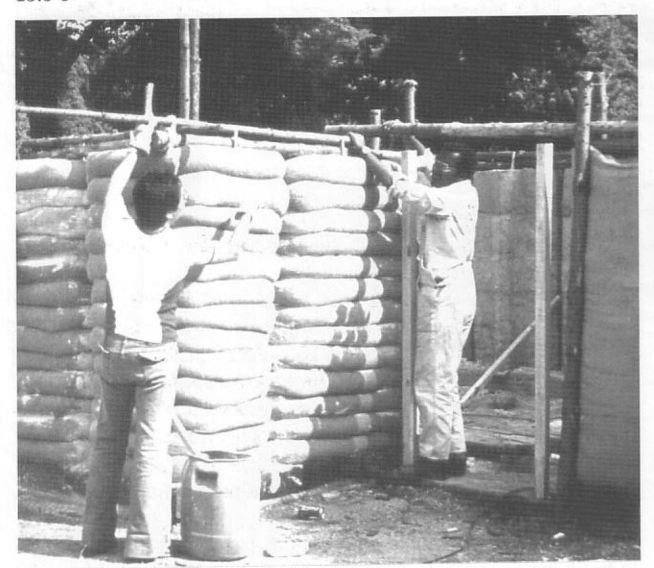




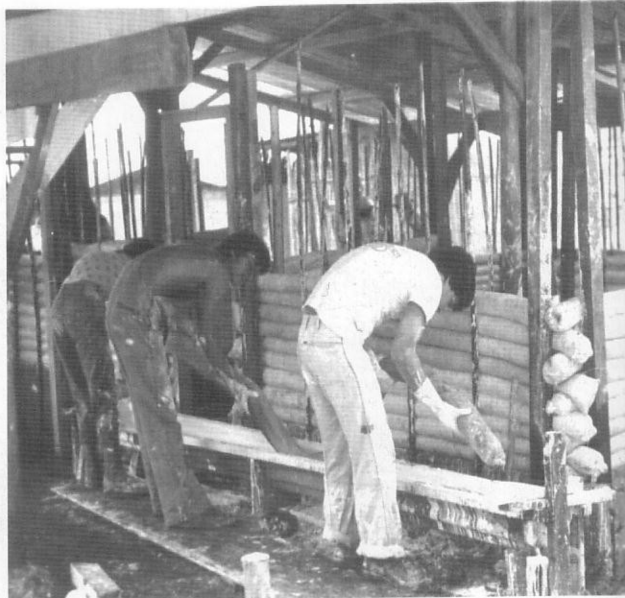




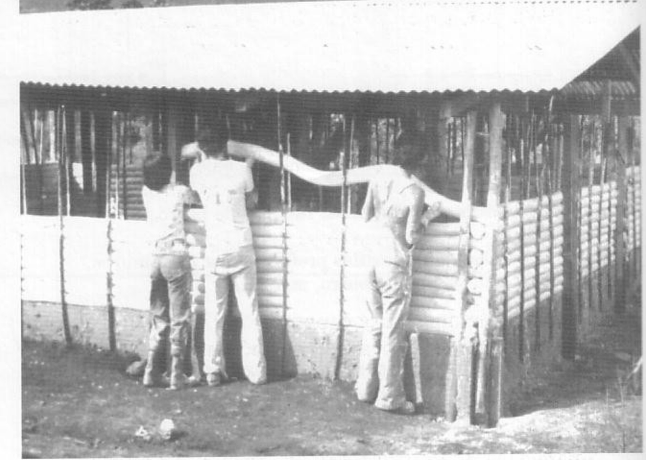
15.5-5



15.5-5, 15.5-6 Sistema para muros con mangueras rellenas con barro, prototipo, FEB, 1978



15.5-7



15.5-8

dráulica, 2 kg. de sal común, 1 kg. alumbre, 1 kg. de tierra arcillosa y aproximadamente 40 litros de agua (Minke, 1980).
En 1998 el FEB y científicos de la universidad de Santiago de Chile elaboraron en un proyecto de investigación un diseño para una vivienda antisismica de tapial reforzado. La vivienda se construyó en 2001 y tiene 55 m² de superficie útil (ver Fig. 15.4-6).
El diseño está regido por la idea de separar la estructura de la cubierta de la de los muros. La cubierta descansa sobre columnas independientes de los muros macizos de tapial, haciendo que ambos elementos se muevan de acuerdo a su propia frecuencia en caso de un sismo.
Los muros de tapial de 40 cm en forma de L y U. El ángulo recto que se forma en estos elementos se sustituye por un ángulo de 45°para rigidizar la esquina. En las esquinas tienen un espesor distinto en los ángulos debido a que las fuerzas mayores actúan en las esquinas durante un sismo.
El muro de tapial descansa sobre un sobrecimiento de hormigón ciclópeo de 50 cm de espesor. Los refuerzos verticales del tapial los constituyen cañas de coligüe (bambú chileno) de 2.5 a 5 cm de espesor, fijados al encadenado superior e insertados en el cimiento.
El encadenado está constituido por dos rollizos de álamo en forma de escalera sobre los muros.
Las ventanas y puertas son de piso a techo y no tienen segmentos de muro macizo sobre los vanos.



15.5-7a 15.5-9 Vivienda prototipo de bajo costo, Guatemala, 1978

Asimismo el tímpano de las fachadas este y oeste se ejecutó con un tabique aislado estructuralmente para evitar el peligro de la caída de materiales macizos durante el sismo.

15.5 Muros de mangueras rellenas con barro

Diferentes soluciones para construir muros utilizando textiles rellenos con tierra arcillosa, pómez o arena se han estudiando como parte de un proyecto de investigación en el FEB que comenzó en 1978.
Se ensayaron dos nuevos sistemas en una vivienda prototipo de bajo costo, para zonas propensas a sismos en países en vías de desarrollo. La primera ilustrada en la Fig. 15.5-2 consiste en muros formados por dos capas de yute. Se clavan al suelo columnas delgadas de madera y se fija el yute por dentro de la estructura. El espacio que queda se rellena con tierra. El muro concluido se puede ver a la derecha del prototipo en la Fig. 15.5-1).La investigación mostró también que los elementos con ese tipo de relleno se pueden prefabricar en longitudes de hasta 10 m y luego doblarse y enrollarse. (ver Figs. 15.5-3 y 15.5-4).
El segundo sistema consiste en mangueras de yute rellenas con pómez o suelo arenoso (Fig. 15.5-5). La tela se cubre con varias capas de pintura de cal (Fig. 15.5-6) para prevenir la putrefacción del material y para estabilizar la superficie e impermeabilizarla.
Como parte de un proyecto de investigación de cooperación del FEB, UFM y CEMAT en 1978, se construyo una vivienda prototipo de 55 m² en Guatemala utilizando mangueras rellenas para los muros.
Esta técnica se desarrolló a partir de los ensayos con la técnica antes expuesta y adaptada a las condiciones locales de Guatemala (Figs. 15.5-7 a 15.5-9). En ella, las mangueras de 10 cm de diámetro se hicieron de tela de algodón y se rellenaron con suelo volcánico compuesto fundamentalmente de pómez. Estas se embebieron en una lechada de cal (para evitar la putrefacción de la tela) y luego se colocaron entre columnas verticales ubicadas a una distancia de 2.25 m.
Una estabilidad adicional se logro con cañas de bambú fijadas verticalmente a un distancia de 45 cm entre cada panel. Luego de que los muros se fijaron se les dio un acabado con dos capas de pintura de cal elaborada con 1 bolsa de cal hidráulica, 4 kg de sal común, 2 kg alumbre y 30 litros de agua.
La estructura de la cubierta descansa sobre columnas ubicadas a 50 cm de los muros hacia el interior. Los costos materiales de esta estructura resultaron ser la mitad de los costos de una vivienda similar construida con bloques de concreto.
Muros construidos con mangueras de algodón rellenas con barro alivianado con arcilla expandida fueron descritos en secciones 10.8 y 14.10.
Un pequeño manual de 50 páginas con informacion ampliada sobre este tema se puede bajar de Internet en español e inglés en www.asl.uni-kassel.de/~feb/veroff/veroff1_d.htm

16. Ejemplos de construcciones modernas de tierra

16.1 Generalidades

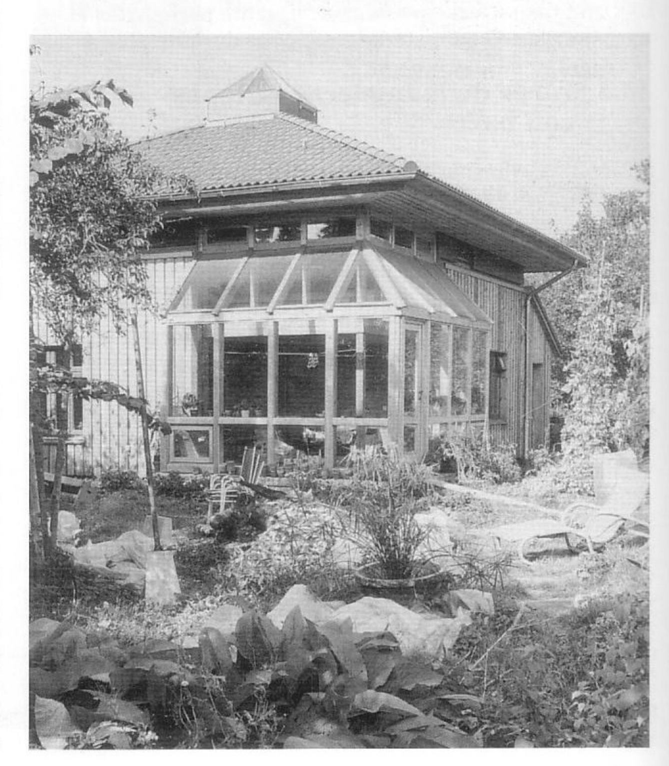
Como se muestra en los ejemplos de este capitulo, las viviendas modernas en las que el barro es el material predominante no requieren tener ninguna característica especial en su apariencia. Pueden ser convencionales o modernas, simples o sofisticadas, humildes o lujosas. En climas fríos el barro como material de construcción por lo general no es visible desde el exterior ya que es necesario revestirlo con aislamientos térmicos adicionales y protección contra las inclemencias del tiempo. Sin embargo el interior puede desplegar una variedad de técnicas y sus múltiples aplicaciones. En este capitulo, se documentan algunas viviendas de este tipo, con ejemplos de climas cálidos donde se requiere menor aislamiento térmico, por lo que se pueden mostrar superficies exteriores vistas de barro. Algunas viviendas modernas con cúpulas y bóvedas la mayoría con superficies exteriores de barro fueron ya mostradas en la sección 14.7.10. Aquí se muestran aparte de residencias, otros ejemplos de arquitectura en barro con diferentes funciones.

16.2 Residencia, Hörnerkirchen, Alemania

La residencia se caracteriza por una planta libre y un invernadero integrado de dos pisos. El exterior es atractivo debido a sus articuladas y bien proporcionadas fachadas. Debido a las malas condiciones del suelo, en el nivel del piso debió hacerse una losa de hormigón sobre la que se aplicó una capa de barro alivianado con arcilla expandida para obtener suficiente aislamiento térmico, cubierta con una alfombra de fibra de coco. El barro alivianado de 14 cm de espesor se bombeo con una bomba de hormigón común.
Los muros consisten en un entramado de madera relleno con barro alivianado con arcilla expandida y un aislamiento térmico exterior adicional cubierto con planchas de madera formando una cámara de aire.
Los muros de barro fueron ejecutados por el propietario y sus amigos.

Especificaciones:
Cimientos: Losa de hormigón sobre una capa de arena
Piso: Aislamiento térmico de 4 cm, 14 cm de barro con mineral; fibra de coco, en áreas húmedas planchas de corcho.
Entrepiso: Madera
Muros exteriores: Entramado de madera con columnas de 12 x 12 cm, relleno de barro alivianado con mineral de 18 cm de espesor; 6 cm de lana mineral; 4 cm cámara de aire; planchas de madera
Muros interiores: Entramado de madera con columnas de 12 x 12cm; mampostería de ladrillos reciclados
Cubierta: Estructura de madera; 18 cm de aislamiento térmico; cubierto con tejas. Planchas de yeso y fibras fijadas por dentro
Sistema de calefacción: Calentador a gas con paneles radiantes de agua caliente al nivel del zócalo.

Diseño: Dirk Bäumer, Hamburgo, Alemania
Conclusión: 1987
Superficie: 116 m²



EG

OG

North-East

North-West

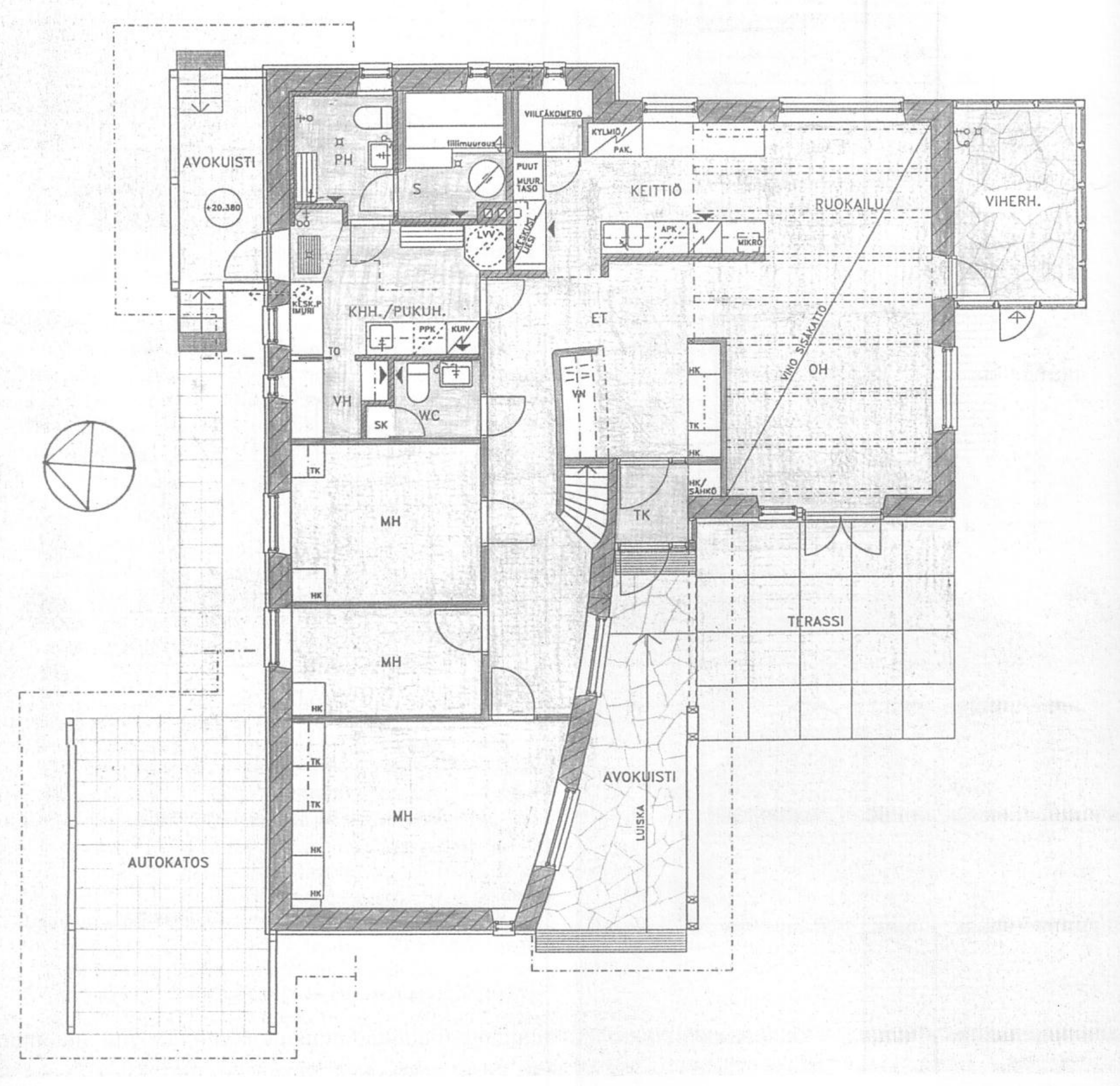
South-East

South-West

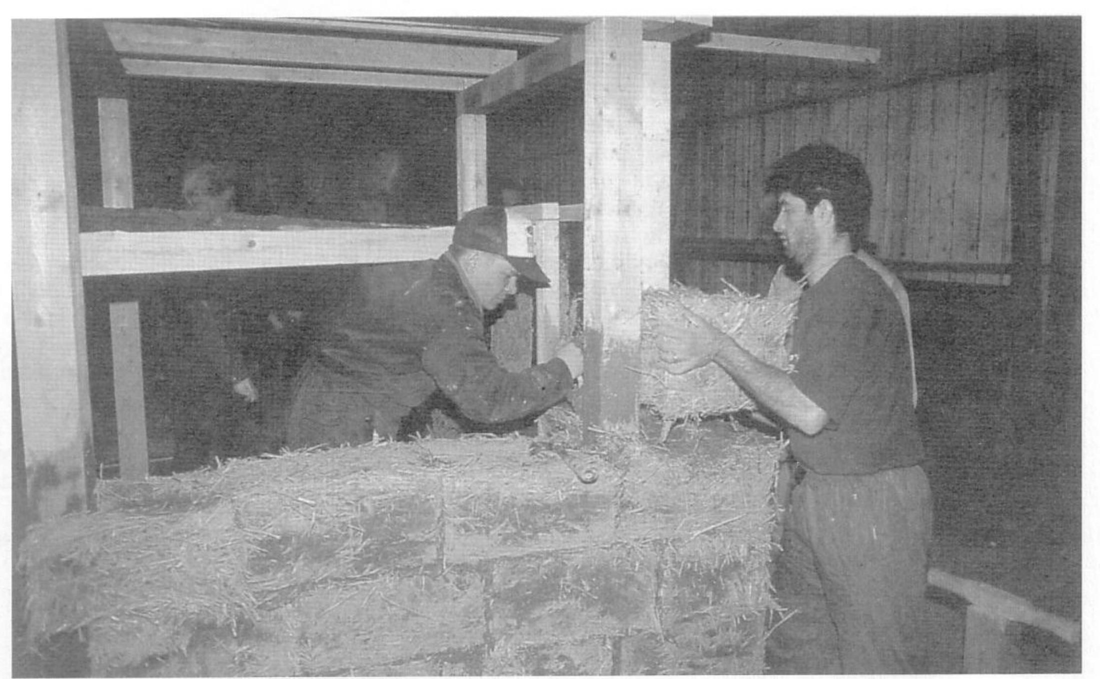
16.3 Residencia en Turku, Finlandia

La edificicación parcialmente construida en dos plantas, se situa a las afueras de la ciudad y alberga a una familia de cinco miembros. El sistema estructural de los muros lo constituye un entramado de madera. Los muros exteriores se construyeron con bloques prefabricados de 40 cm. de espesor de una mezcla de tierra arcillosa y paja, cuyo peso específico es de 450 kg/m³. Los bloques fueron cubiertos con un entablonado de madera en algunas secciones y en otras con un revoque de cal. El coeficiente global de transferencia de calor U de los muros es de 0,28 W/m²K.

Diseño: Teuvo Ranki, Finlandia
Conclusión: 1999
Superficie: 127 m²



16.3-1



16.3-2

16.3-3

16.4 Viviendas apareadas, Kassel, Alemania

Estas dos viviendas se caracterizan por sus fachadas y cubiertas verdes que se integran al paisaje y por su concepto ecológico apropiado. El rasgo típico de la composición es que los espacios están dispuestos alrededor de un vestíbulo central multiuso sobre el que se encuentra una galería que evita los corredores (Fig. 16.4-4) y que integra un invernadero. Todos los muros muestran el entramado de madera y las superficies de barro vistas. La cubierta de madera tiene un diseño especial en forma de cúpula hecha de troncos (Fig. 16.4-5) o vigas.
Estantes e inclusive el lavamanos del baño se hicieron de barro (Fig. 14.10-5).

Arquitecto: Gernot Minke, Kassel, Alemania
Conclusión: 1985
Superficie construida: 160 m² + 120 m²

Especificaciones:
Cimiento: Cimiento corrido de hormigón
Pisos: 27 cm de grava gruesa, cartón asfáltico para evitar la humedad ascendente, cubierta con tablones de madera o 14 cm de espesor de barro alivianado con arcilla expandida con estera de sisal y en áreas húmedas planchas de corcho
Muros exteriores: Ladrillos crudos, perfiles de barro extruido; todo con aislamiento térmico adicional; cámara de aire y paneles madera no tratada
Muros interiores: Entramado de madera con relleno de elementos de barro extruido
Cubierta: Estructura de madera; 12 cm aislamiento térmico; membrana de 2 mm de espesor de tela de poliéster cubierta con PVC; rellena con 15 cm de tierra mezclada con arcilla expandida; hierbas silvestres
Calefacción: Calentador a gas con paneles radiantes de agua caliente al nivel del zócalo



16.4-1

16.4-2

16.4-3

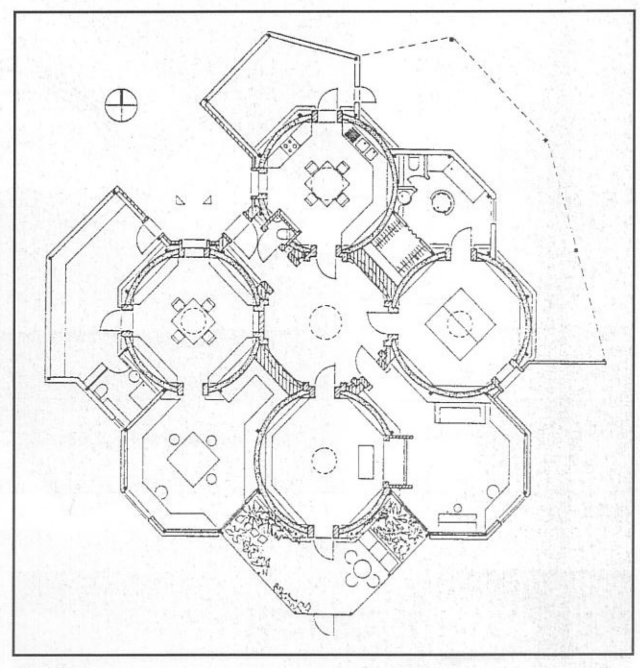
16.4-4

16.4-5

16.5 Residencia con estudio, Kassel, Alemania

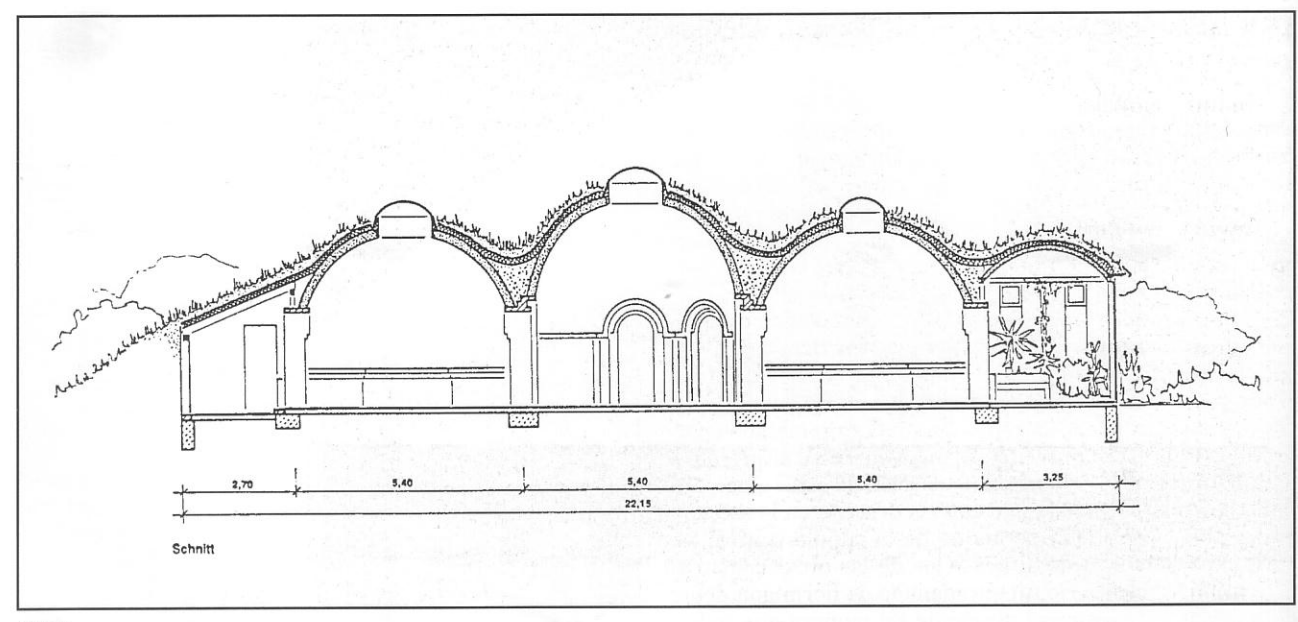
Esta residencia combinada con el estudio de autor fue construida en 1992, en el barrio ecológico de Kassel, Alemania. Todos los espacios así como un baño y el invernadero están cubiertos por cúpulas de barro. El acceso lo cubren tres bovedillas construidas con ladrillos crudos como se explico en la sección 14.7-8. El vestíbulo central está cubierto por una cúpula de 5.2 m de luz libre y 4.6 m de altura (Fig. 16.5-4), rematada con un tragaluz en forma de domo, compuesto por dos capas de vidrio acrílico. Partiendo de esta cúpula central se crean cuatro cúpulas que cubren los otros espacios. Las cuatro tienen la misma luz que la cúpula central y una altura de 4 m, están igualmente rematados por un tragaluz y están provistos de una ventana a altura normal (cocina Fig. 16.5-5). La construcción de estas cinco cúpulas se ejecuto con la guía rotatoria descrita en la sección 14.7.7 (Fig. 16.5-9). El arranque de la cúpula central se encuentra a 1.75 m de altura y los de las otras cuatro a 0.75 m, no es necesario un encadenado de hormigón debido a que la estructura se diseñó de tal manera que todas las fuerzas resultantes se pierdan en el medio tercio de las fundaciones.

Las cúpulas en el baño y el invernadero se construyeron sobre un hexágono irregular y se ejecutaron utilizando una técnica derivada de una técnica afgana (sección 14.7.5), uti-

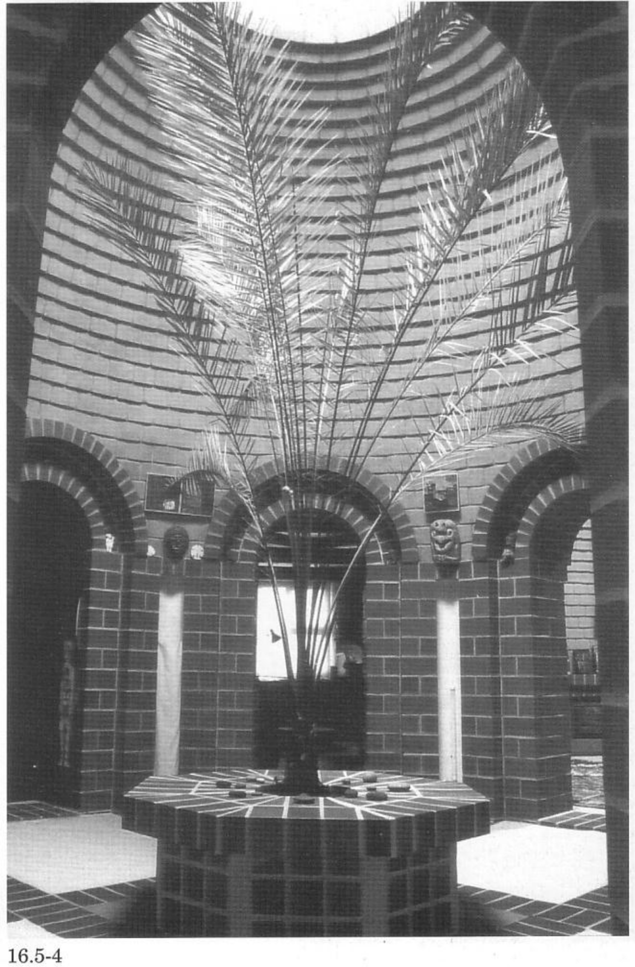


16.5-1

16.5-2



16.5-3

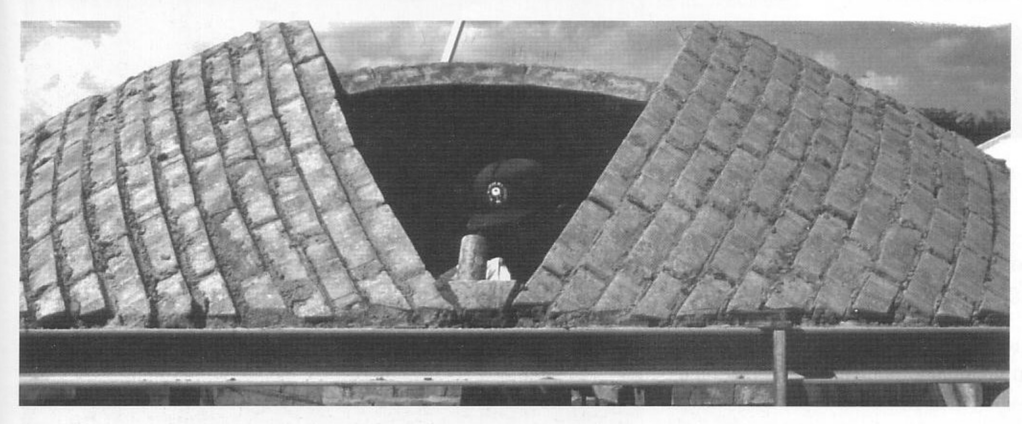


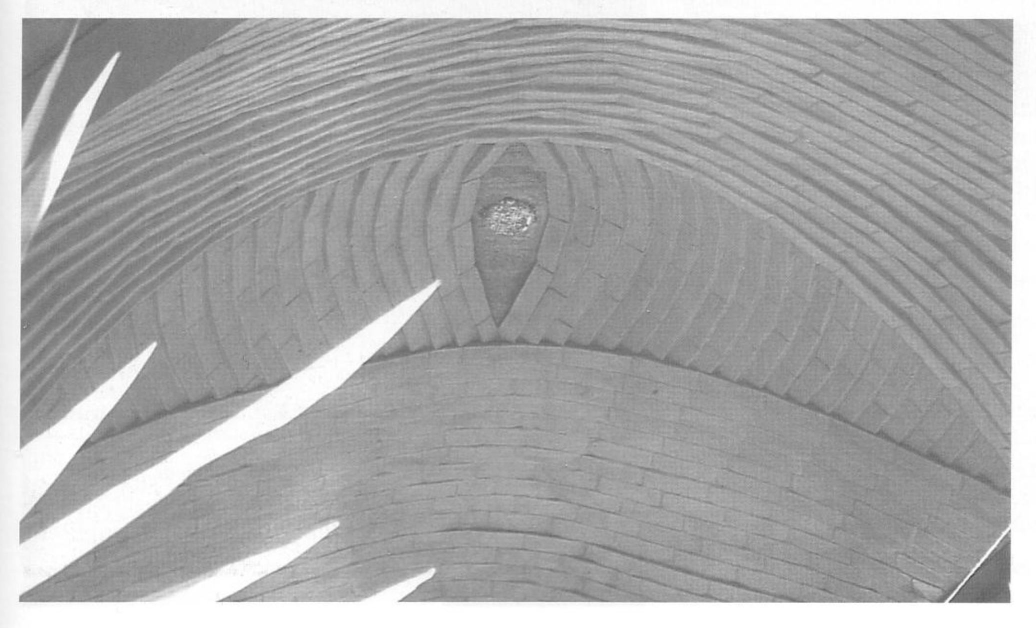
16.5-4



16.5-5


16.5-6


16.5-7


16.5-8

16.5-9

lizando arcos inclinados con un ángulo de 40-60° con respecto a la horizontal (Figs. 16.5-6 a 16.5-8) sin utilizar encofrado.

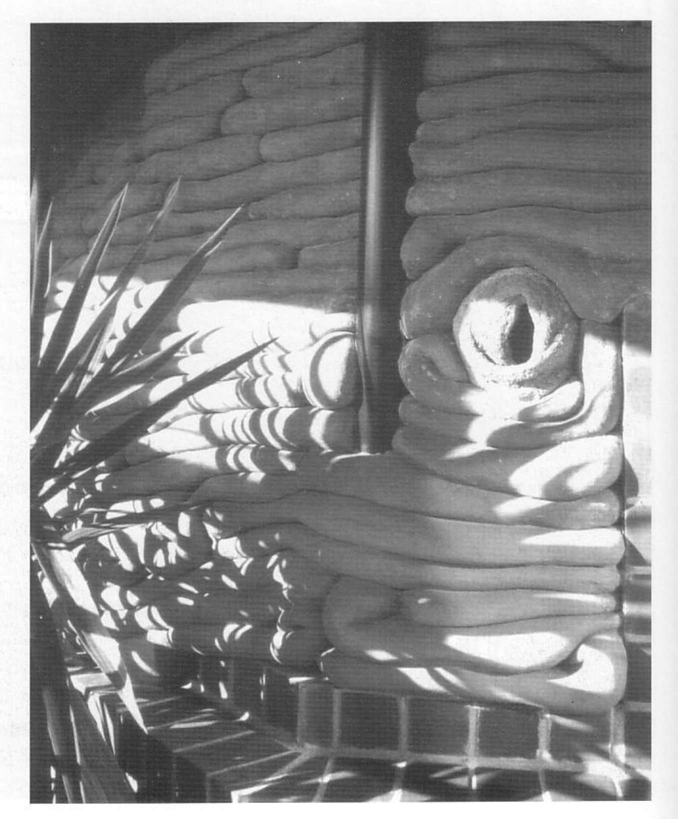
Las abertura que queda luego que las dos partes de la cúpula alcanzan un punto en el que se encuentran, se cubre posteriormente cambiando el patrón de los arcos a 90°.

Todas las cúpulas están cubiertas con una capa adicional de 20 cm de lana mineral para el aislamiento térmico y selladas con una membrana de 2 mm de espesor de tela de poliéster cubierta con PVC, resistente al agua y las raíces.

Finalmente se cubre con 15 cm de tierra.

La Fig.16.5-10 muestra un detalle del muro almacenador de calor del invernadero construida con mangueras rellenas de barro (ver sección 10.8).

Diseño: Gernot Minke, Kassel, Alemania
Conclusión: 1993
Superficie construida: 155 m^2 + 61 m^2 (estudio)



16.5-10

16.6 Casa de campo, Tabio, Colombia

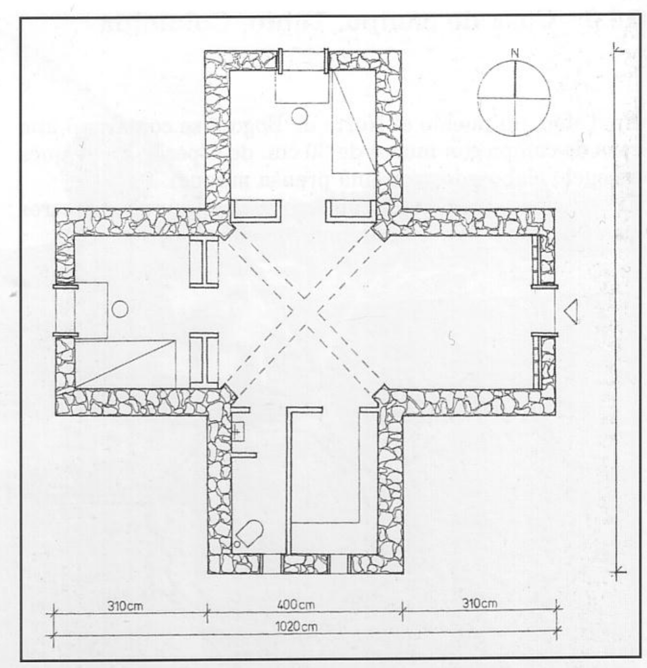
En Tabio, un pueblo al Norte de Bogotá se construyó una casa de campo con muros de 30 cm. de espesor, de bloques de suelo elaborados con una prensa manual.
El espacio octogonal está cubierto por una cúpula, los otros espacios por bovedillas, algunas de ellas inclinadas.

La protección de la cubierta contra las inclemencias del tiempo se ejecuto con cartón asfáltico.

Diseño: ARIT, Bogotá

16.7 Vivienda de bajo costo, Mount Abu, Rajasthan, India

La vivienda fue construida como un prototipo para viviendas de bajo costo para la Brahma Kumaris World Spiritual University en una nueva área del campus a las afueras de Mount Abu. Está cubierta por dos bóvedas que se interceptan formando espacios para dos habitaciones, un estudio o estar, un pequeño baño y una cocina.
Las bóvedas se construyeron con bloques de suelo local no estabilizado producidos en una prensa manual. Se utilizó la técnica de las bóvedas nubicas sin encofrado (ver sección 14.7-4). La superficie se selló con cartón asfáltico. Sobre las bóvedas se moldearon guías para aplicar losetas de piedra arenisca formando una cámara de aire ventilada (Fig. 16.7-4).
Esto ofrece un buen aislamiento térmico ya que los rayos solares son reflejados por la superficie de la piedra arenisca y la pequeña cantidad de transferencia de calor a través de las planchas se reduce por la cámara de aire ventilada.
El muro vertical Este, tiene un revestimiento exterior de piedra de granito local y una capa interior de bloques de suelo entre los dos se hizo una cámara de aire de tal manera que el sol de la mañana no caliente el interior.
El tamaño y la posición de las aberturas de ventana actúan como celosías; estas están diseñadas para que el sol en verano no entre a las habitaciones mientras que en invierno si pueda entrar y así calentarlas.

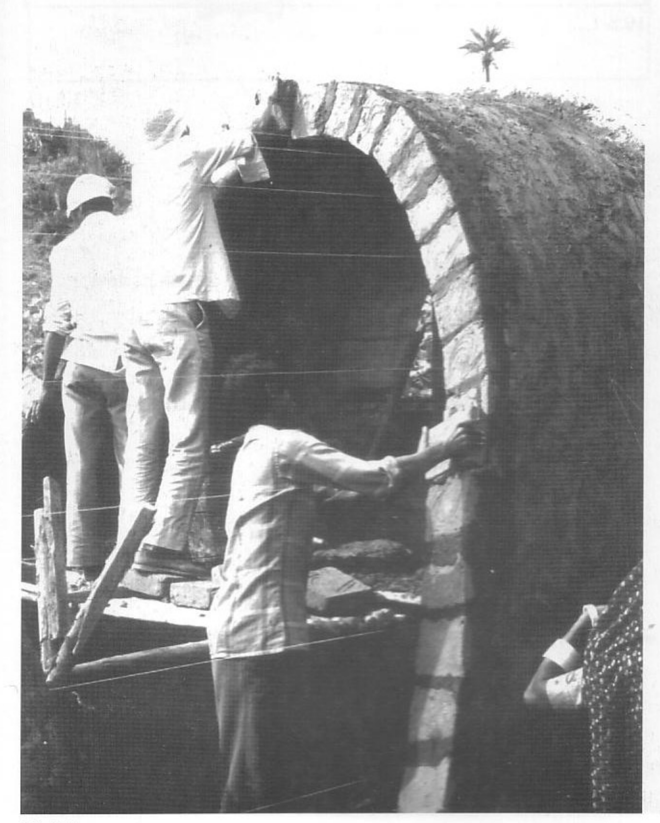


16.7-1

Climáticamente el diseño fue muy efectivo. Las ventanas tienen vidrios simples. La temperatura interior en verano por el día es 10ºC inferior que al exterior.

16.7-2

16.7-3

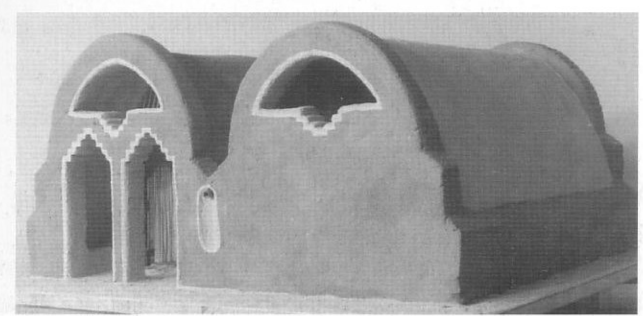


16.7-4

El agua caliente para el baño y la cocina se produce por medio de un colector solar y la electricidad mediante un generador eólico pequeño de 500 watts y baterías solares. Una solución aun más económica fue diseñada por el autor pero no se construyó. El modelo se muestra en la Fig. 16.7-5.

Diseño: Gernot Minke, Kassel, Alemania
Diseño del sistema energético: Joachim Pilz, Mt. Abu, India
Conclusión: 1993
Superficie construida: 48 m^2

Especificaciones:
Cimiento y zócalo: piedras de granito local
Bóveda: Bloques de tierra no estabilizada; cámara de aire; losetas de piedra arenisca
Muros principales: Granito local; muro Este con cámara de aire y bloques de suelo en interiores
Muros interiores: Bloques de suelo



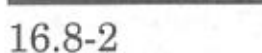
16.7-5

16.8 Residencia Tucson, Arizona, Estados Unidos

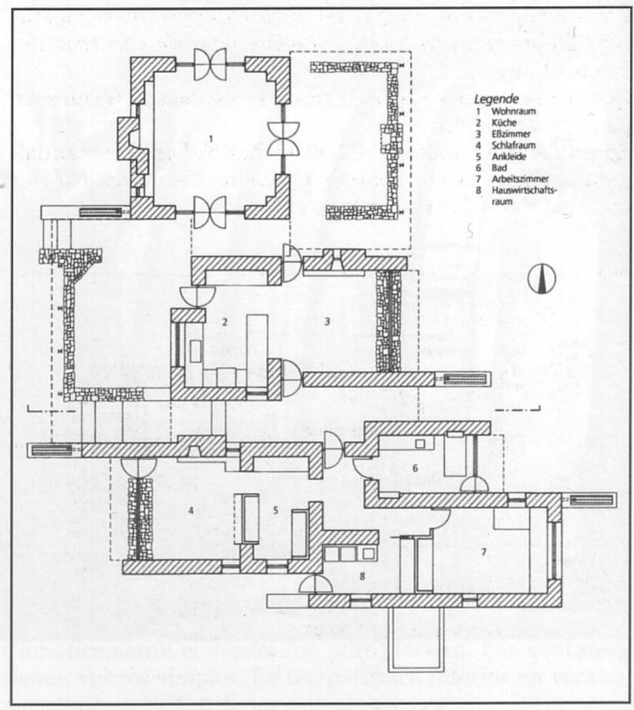
Tres elementos cúbicos forman esta vivienda. Los muros de la vivienda esconden la cubierta inclinada.
Los muros de tapial son de barro estabilizado con un porcentaje bajo de cemento y tienen un espesor de 60 cm. Las partes superiores de los muro son de barro estabilizado con un porcentaje más elevado de cemento para progeterlos de las inclemencias del tiempo.
Los muros de tapial son vistos y no recibieron ningún tratamiento posterior.

Diseño y construcción: Paul Weiner





16.8-2



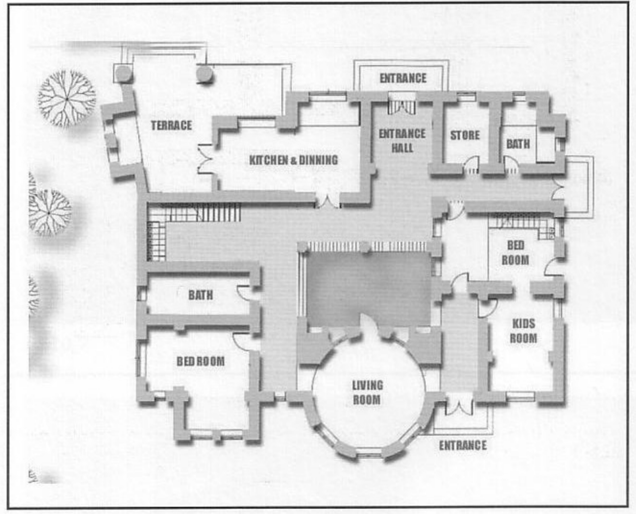
16.8-1

16.8-3

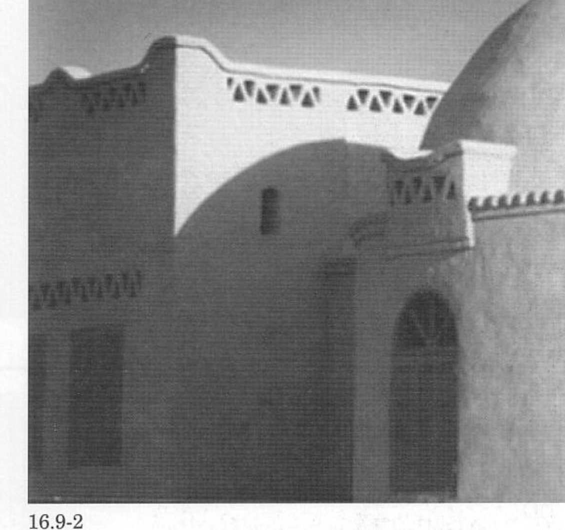
16.9 Residencia, Túnez, lago Quaroun, Fayoum, Egipto

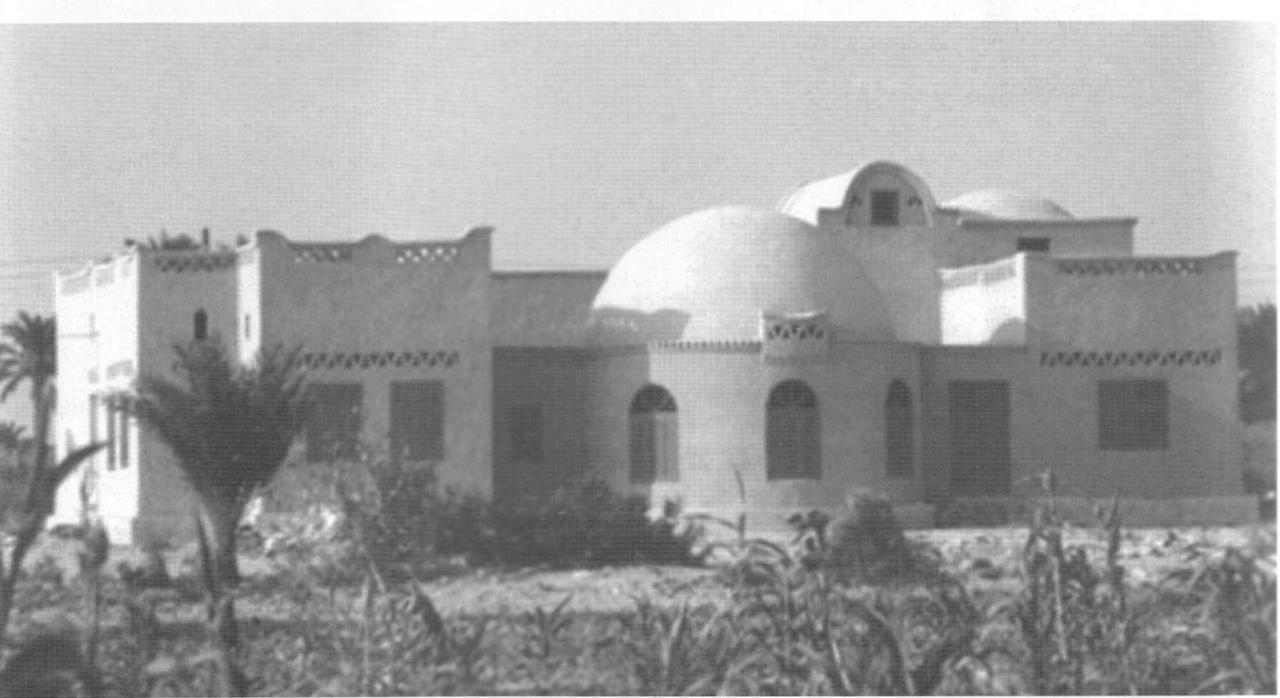
La vivienda es un ejemplo del mejoramiento y la recuperación de las técnicas locales tradicionales de construcción con adobes.
Las habitaciones se encuentran distribuidas en torno a un patio sombreado.
Se emplearon en total 110 000 adobes elaborados manualmente. El material se obtuvo parcialmente del movimiento de tierra de los cimientos.

Diseño: Adel Fahmy, Cairo, Egipto
Conclusión: 1997
Superficie construida: 250 m² + 25m² (patio)



16.9-1

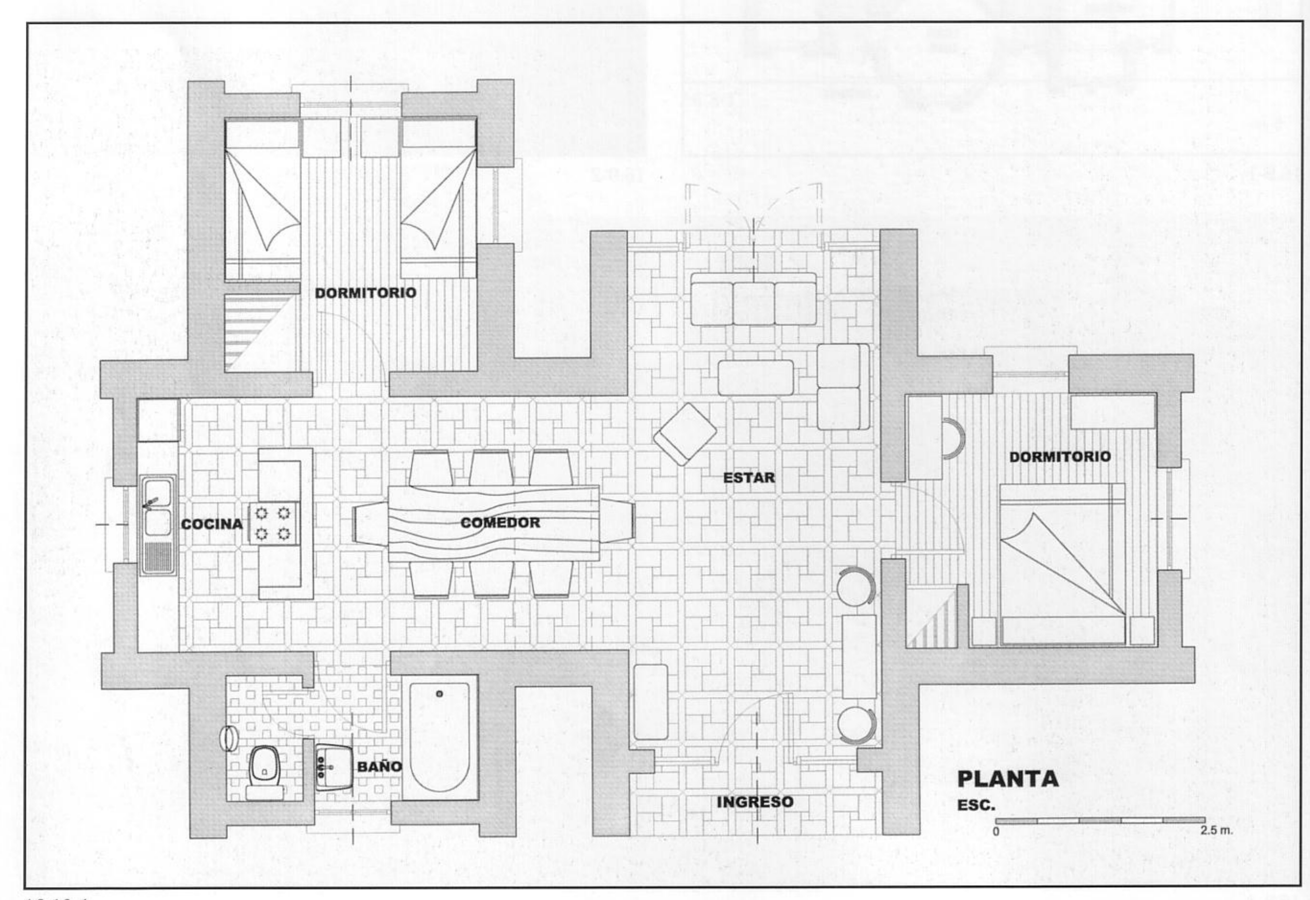

16.9-2


16.9-3

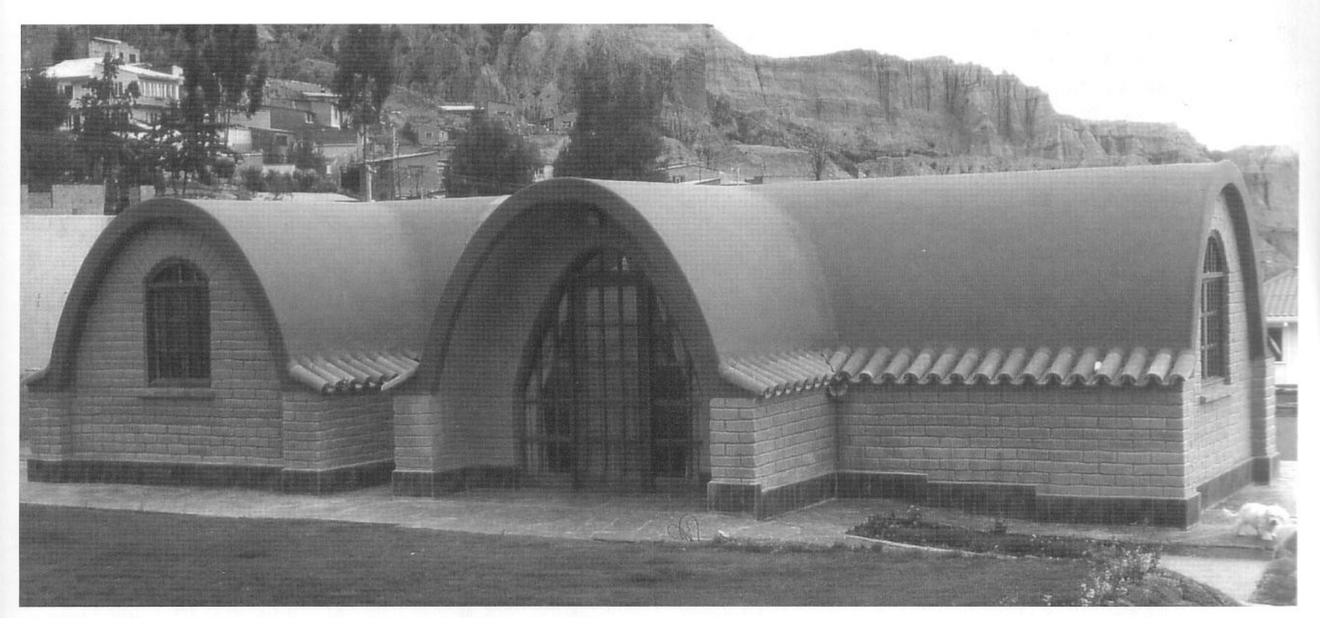
16.10 Residencia, La Paz, Bolivia

La casa está en las afueras de la ciudad a una altura de 3500 m sobre el nivel del mar.
La disposición de los dormitorios y la sala responde a una búsqueda de conjugar el asoleamiento y el aprovechamiento de las vistas hacia la ciudad.
Los muros y bóvedas fueron construidos con adobes elaborados a mano, que dan como resultado una buena absorción de calor en el día provocando un retraso térmico de 6 a 8 horas. Esto significa que durante el día los muros absorben el calor del sol y lo transmiten al interior de la vivienda recién en la noche, momento en el que baja la temperatura exterior y este se hace necesario.
La vivienda fue solucionada constructivamente con cimientos de hormigón ciclópeo. Los muros son de adobe, con un módulo de 28.5 x 28.5 x 8.5 cm.
En el exterior los adobes son vistos y protegidos con sellador a base de polímero acrílico. En el interior los muros y las bóvedas quedan vistas y se protegen con sellador a base de polímero acrílico mate.
Los dormitorios y un sector de la sala tienen revoque de yeso con pintura.
La bóveda está revocada e impermeabilizada con una capa de mortero de barro que la uniforma, un enlucido de barro, un sellador a base de polímero acrílico, una capa impermeabilizante acrílica formando una película elástica y finalmente con pintura superlatex a base de resina acrílica con acabado mate.

Diseño: Raúl Sandoval, La Paz, Bolivia
Conclusión: 1999
Superficie construida: 84 m^2



16.10-1



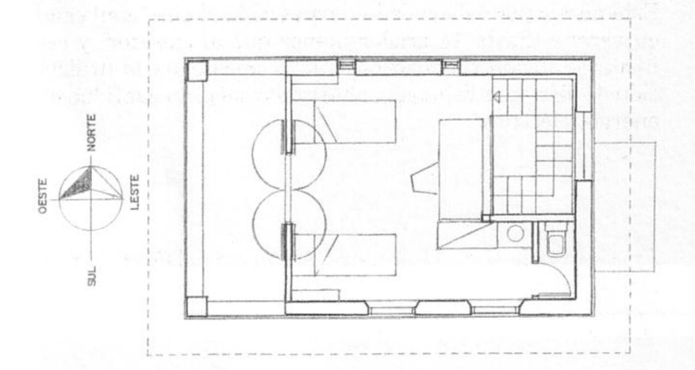
16.10-2

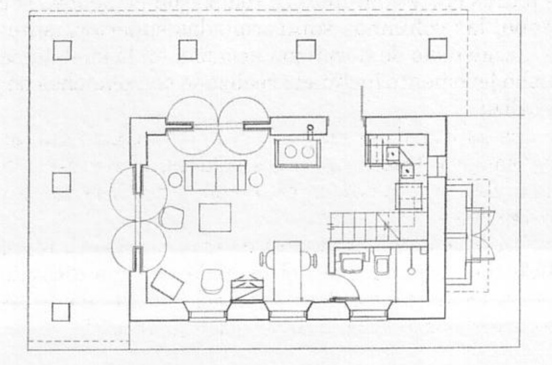
16.10-3

16.11 Casa de campo, San Pedro, San Pablo, Brasil

Esta construcción ubicada en la franja de montañas de la costa (Serra do Mar), en el Estado de San Pablo, es una casa de campo. Los muros exteriores son de tapial de 45 cm de espesor empleando el suelo local estabilizado con un poco de cal. Los muros interiores son de bloques de suelo comprimido. Debajo del techo se almacena agua calentada por colectores solares en tres tanques de una capacidad total de 1500 litros. La vivienda se amplió posteriormente con una habitación adicional.

Diseñadores: Paulo Montoro, Kelley White
Conclusión: 1996
Superficie construida: 51 m² + 7 m² (balcón) + 20 m² (ampliación)



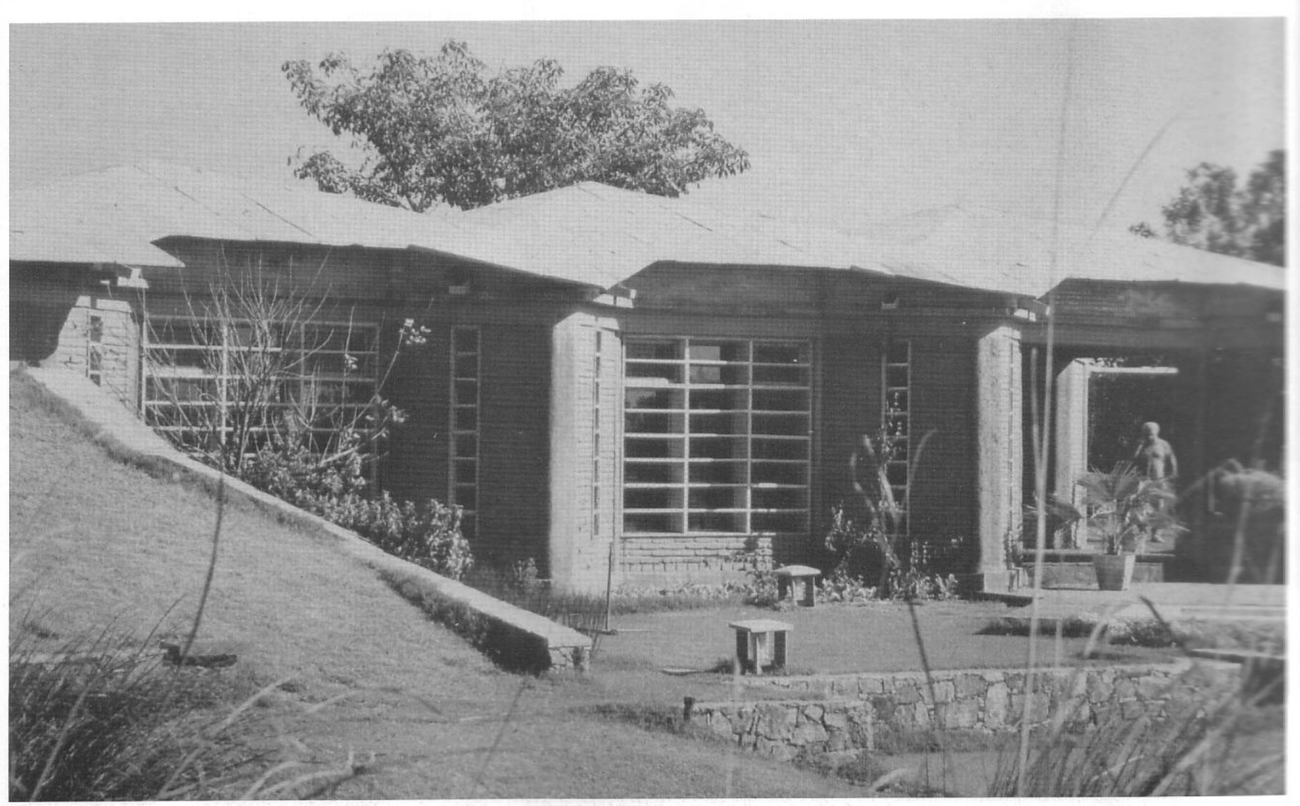


16.12 Finca, Wazirpur, Haryana, India

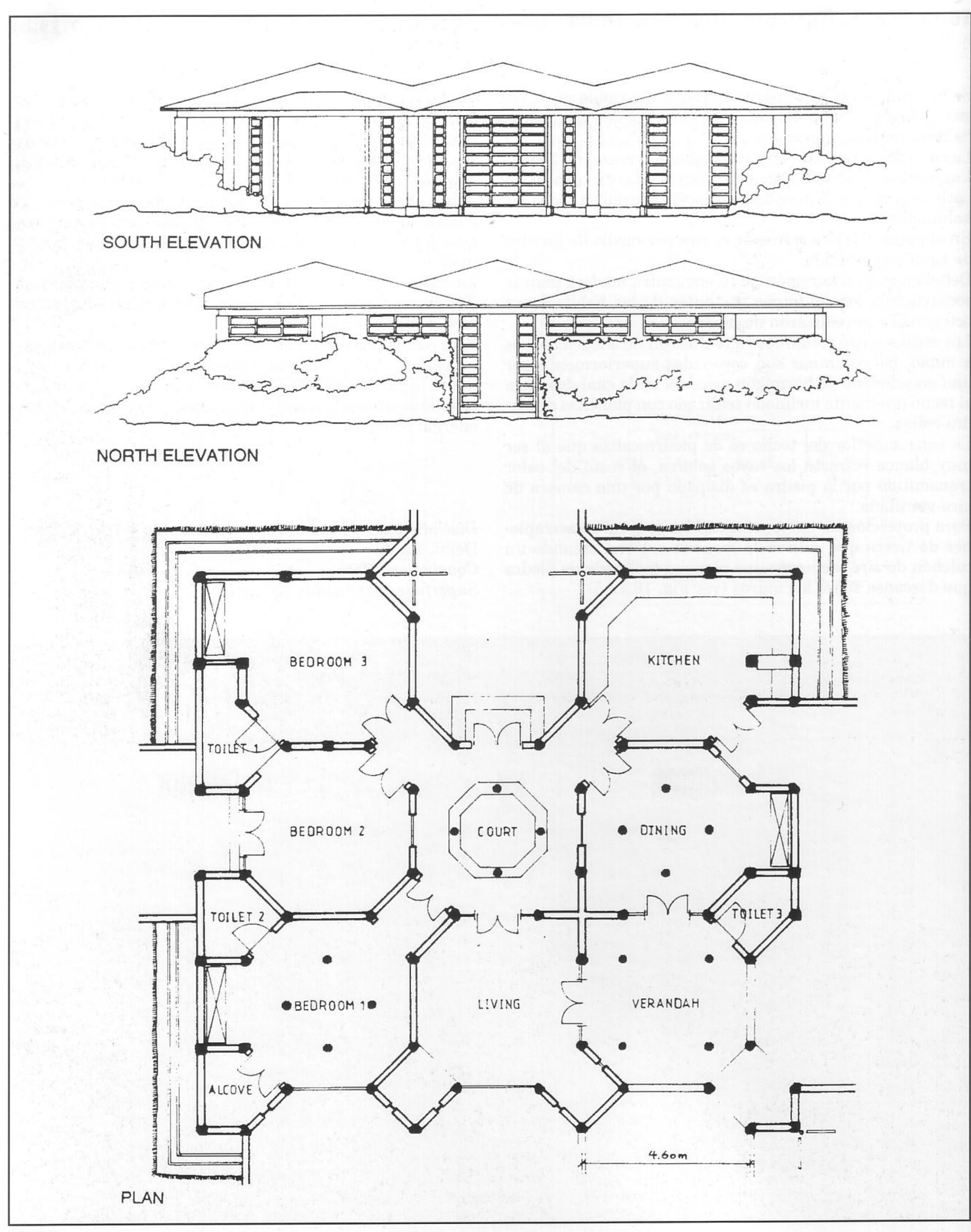
Se buscó adaptar la construcción al clima cálido de la región a los materiales del lugar y a la utilización al máximo de la climatización pasiva.
La edificación tiene un área (incluyendo terraza) de 206m^2.
Las habitaciones se encuentran distribuidas en torno a un patio central que provee de ventilación cruzada a todas las habitaciones.
En el patio se busca refrescar el aire por medio de fuentes de agua y vegetación.
Debido a que en la región no se encuentra madera para la construcción las columnas portantes de las habitaciones octogonales se realizaron de piedra.
Los muros entre columnas se realizaron de adobes hechos a mano, las columnas son coronadas superiormente por una encadenado de hormigón armado, en la cual descansa el techo levemente inclinado realizado con planchas de piedra caliza.
La capa superior del techo es de piedra caliza que al ser muy blanca refracta los rayos solares, el resto del calor transmitido por la piedra es disipado por una cámara de aire ventilada.
Para protección de los vientos cálidos se crearon terraplenes de tierra que cubren la fachada externa creando un colchón de aire mediante una plancha inclinada de piedra que descansa sobre los muros (ver Fig. 16.12-5).

Todas las superficies externas de la edificación tienen un colchón de aire o están sombreadas por aleros y celosías.
Las celosías de piedra de todas las ventanas están diseñadas para proveer de sombra y reflejar la luz al interior.
Además toman la función de una reja de protección.
A través de un sistema de túnel de aire subterráneo, se puede bombear aire fresco a las habitaciones. La distancia del ventilador de 2 kW a la edificación es aproximadamente 60m.
La sección consiste en 2 ductos de ladrillo a una profundidad promedio de 3 m bajo tierra. La velocidad máxima del aire se mantiene en 6m/seg.
Este pasaje por debajo de la tierra enfría el aire bombeado en verano (hasta 14 grados menos que al exterior) y calienta el mismo en invierno, esta técnica evita la utilización de aire acondicionado, ahorrando así gran cantidad de energía eléctrica.

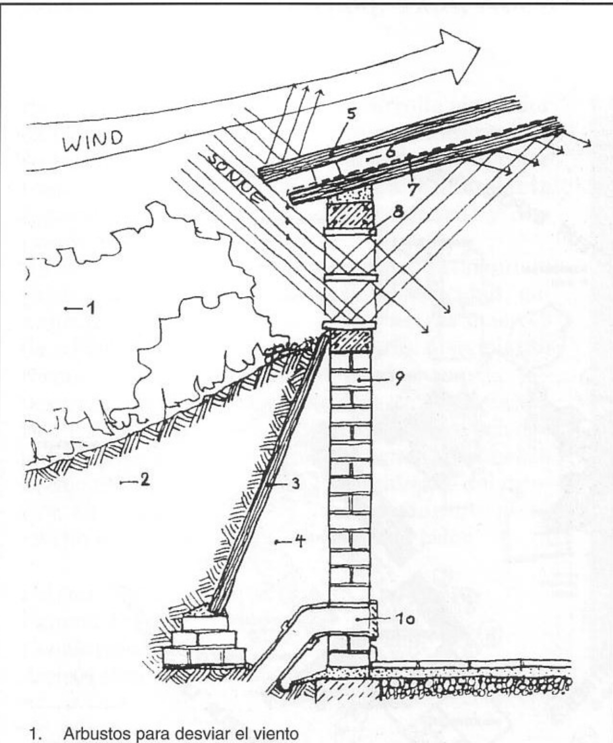
Diseño: Gernot Minke, Kassel, Alemania y DAAT, Nueva Delhi, India
Conclusión: 1993
Superficie construida: 206 m^2



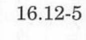
16.12-1

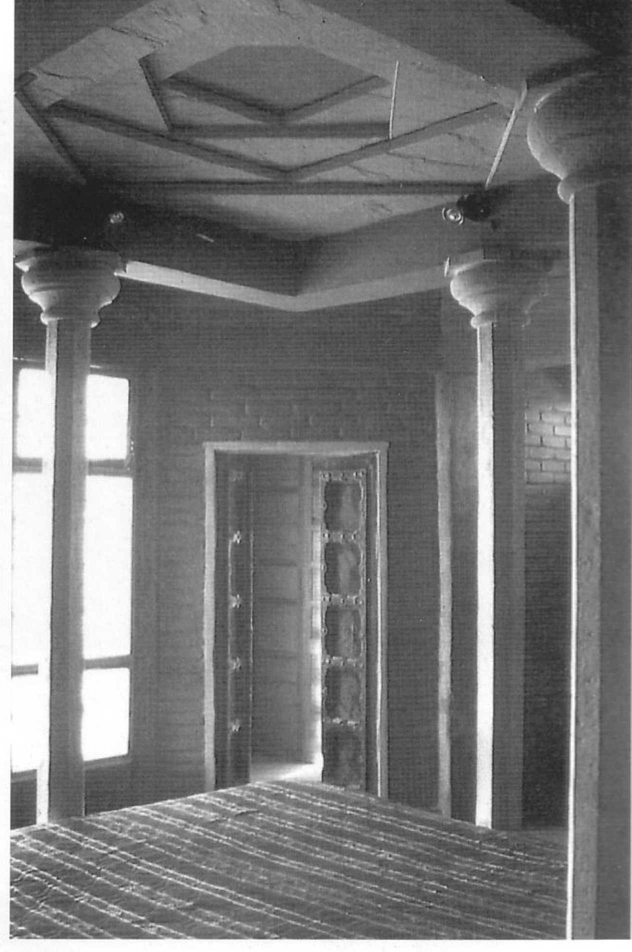

SOUTH ELEVATION
NORTH ELEVATION
BEDROOM 3
KITCHEN
TOILET 1
BEDROOM 2
COURT
DINING
TOILET 2
TOILET 3
BEDROOM 1
LIVING
VERANDAH
ALCOVE
4.60m
PLAN

16.12-2



1. Arbustos para desviar el viento
2. Terraplén de tierra
3. Panel de piedra
4. Cámara de aire para el aislamiento térmico
5. Paneles de piedra de color claro para reflejar la luz
6. Cámara de aire
7. Impermeabilización de asfalto
8. Elementos de piedra de color claro para reflejar los rayos solares
9. Muro de adobe para el equilibrio de la humedad del aire del interior
10. Climatización mediante un túnel de aire subterráneo


16.12-5



16.12-3

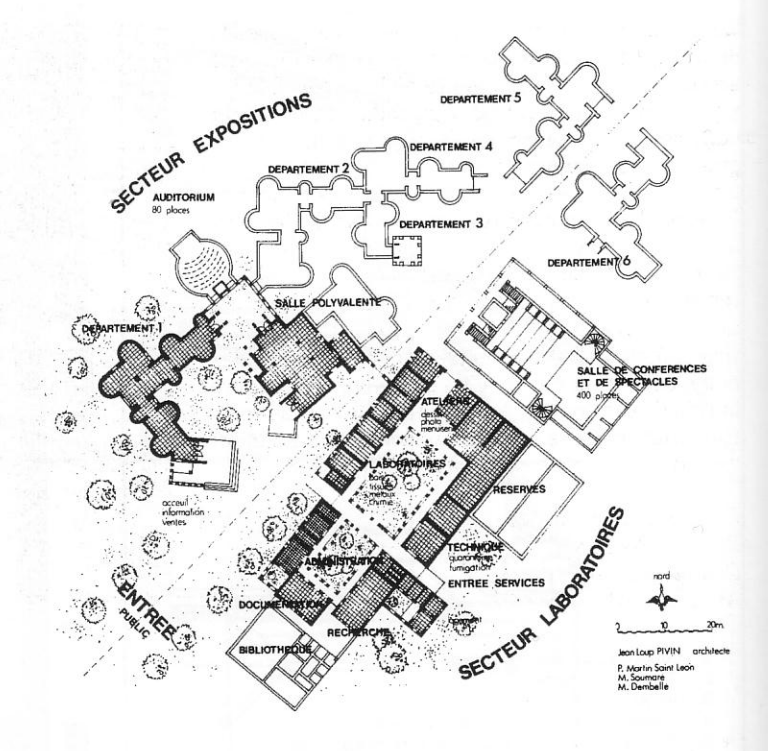


16.12-4

16.13 Museo Nacional de Mali, Bakamo, Mali

El museo está ubicado en el centro de la ciudad y está compuesto por varias edificaciones de diferentes concepciones como se muestra en la planta. Los cuatro departamentos son investigación, conservación, exhibición y animación.
Los muros se construyeron con bloques de suelo estabilizado elaborados con una prensa manual y fueron revocados con suelo cemento.

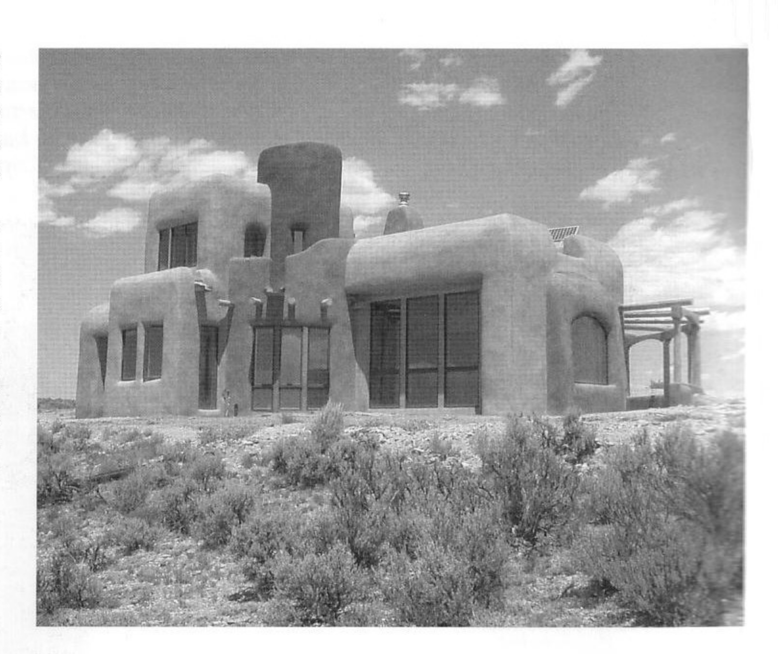
Diseñadores: Jean-Loup Pivin, Pascal Martin Saint Leon
Conclusión: 1982
Superficie construida: 1400 m²

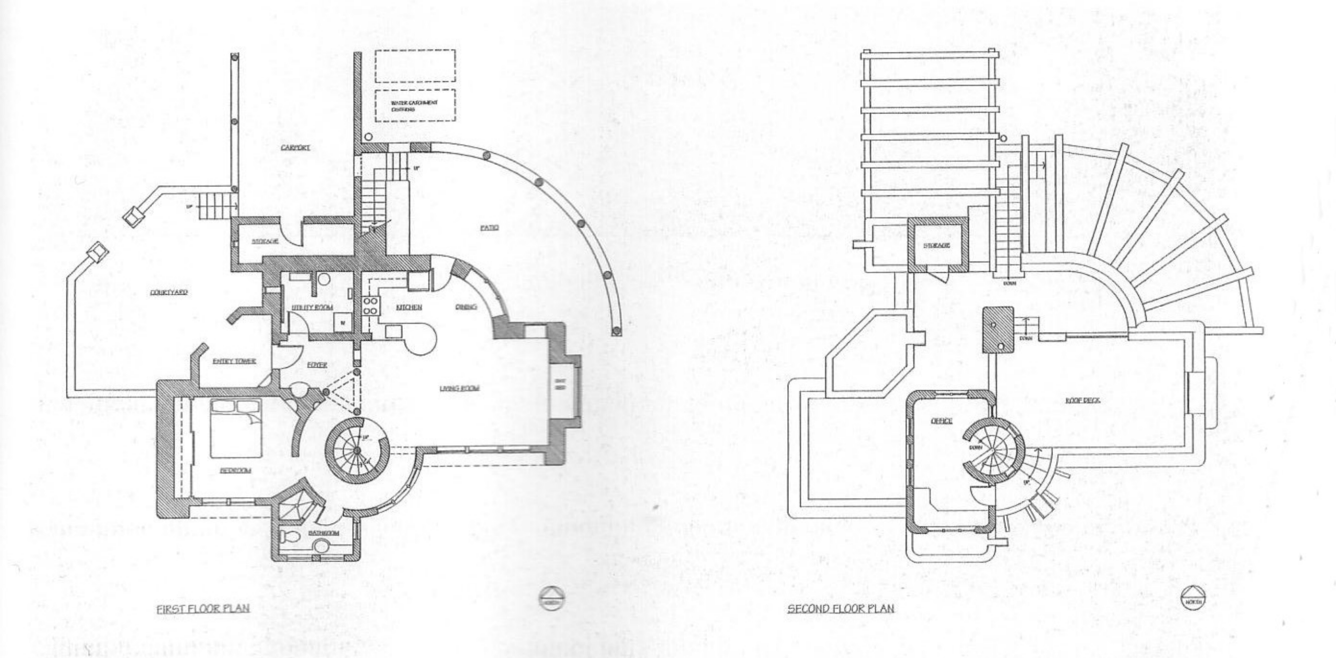


16.14 Casita Nuaanarpoq, Taos, Nuevo México, Estados Unidos

La planta de la edificación se desarrolla alrededor de la caja de escaleras central, que exteriormente se percibe como un elemento aislado por el color rojo oscuro con el que está pintada. En la planta superior se encuentra el estudio (oficina) y una gran terraza panorámica.
La edificación es energéticamente autárquica. Celdas fotovoltaicas proveen de electricidad, ganancia térmica por energia solar, muros masivos de adobe acumuladores de calor y un aislamiento térmico exterior formado por fardos de paja, generan un ambiente confortable en un clima desértico con temperaturas extremadamente variadas entre el día y la noche. Una chimenea solar sobre la caja de escaleras extrae el aire caliente del interior. Una chimenea a leña funciona durante el invierno como una fuente adicional de calor.

Diseño: EDGE Architects, Ken Anderson, Pamela Freund
Conclusión: 2004
Área: 140m²





16.15 Vivienda suburbana, Villa García, Uruguay

Esta casa consta de dos plantas, con un total de 120 m² edificados. El sistema constructivo utilizado fue el de tierra alivianada. Toda la obra se realizó en el lugar, con arcilla y cañas para el cielorraso extraídas del mismo terreno, sin técnicas de prefabricación.
Sobre una platea de hormigón, se realizó un murete perimetral destinado a aislar los muros de barro de la humedad del suelo y de la lluvia. Sobre él se asentó la estructura de madera compuesta por pilares, pies derechos y vigas. Los muros de 20 cm de espesor, se realizaron llenando encofrados de madera con una mezcla de paja de trigo y arcilla. Los techos, livianos, se aislaron con la misma mezcla, colocada entre el lambriz de madera y el techo de teja metálica.
El diseño de la vivienda busca aprovechar al máximo la energía solar pasiva, abriendo la vivienda hacia el Norte, y cerrándola hacia el Sur.

Arquitectos: Kareen Herzfeld - José Luis Mazzeo, Montevideo, Uruguay
Terminación: 1998
Área: 120 m²

Especificaciones:
Cimiento: Platea de hormigón
Pisos: Hormigón lustrado, cerámica rústica y madera.
Paredes exteriores: Estructura de madera rellena de tierra alivianada con revoque interior de tierra y exterior de mezcla de cal, arena y 10% de cemento.
Paredes interiores: Estructura de madera rellena de tierra alivianada con revoque de tierra.
Cubierta: Estructura de madera; 12 cm aislamiento térmico de barro y paja; cubierta de teja metálica.
Calefacción: Estufa a leña.



16.15-1

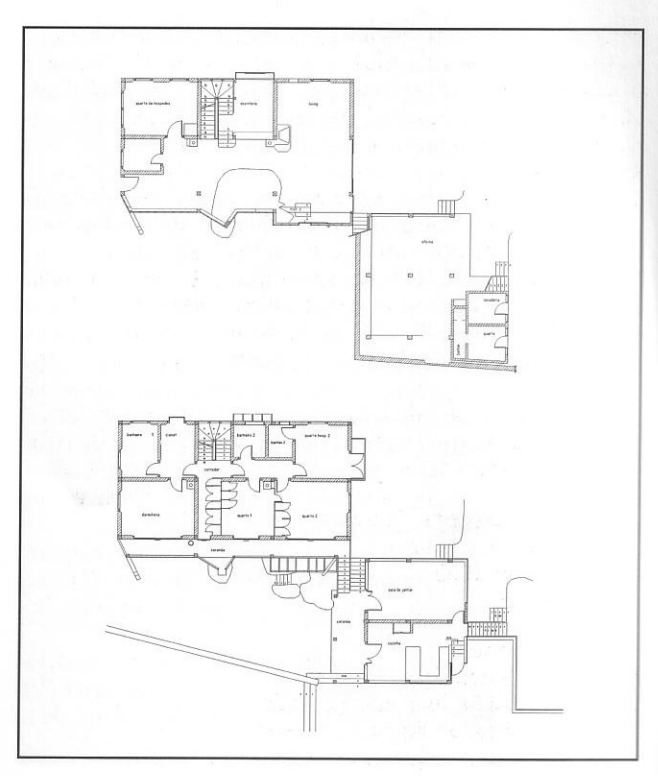


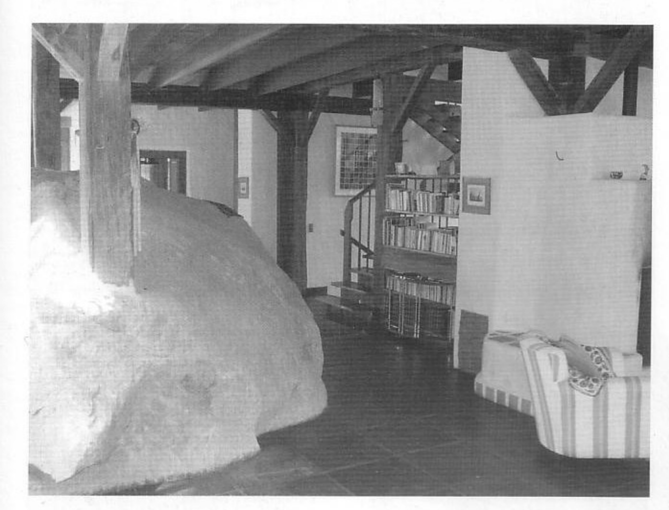
16.15-2
Vista interior de entrada, estar y cocina al fondo.

16.16 Residencia Correas, Petrópolis, TJ, Brasil

La estructura en tres niveles de esqueleto de madera de esta casa, está realizada con perfiles reciclados de una casa de campo antigua. Las paredes internas fueron rellenadas de tapial o adobes; una gran roca fue incorporada a la decoración de la casa.
Los revoques exteriores son de tierra estabilizados con 10% de bosta y 3% de cal y pintados luego del secado con cal.
El techo de vigas de madera fue cubierto con 3 cm de tierra y plantas del tipo de las suculentas.

Arquitecto: Matthias Jonas
Año de realización: 1998









16.17 Casa de campo, Maldonado, Uruguay

Esta casa de campo se encuentra ubicada en un bosque indígena a orillas de la desembocadura de un arroyo en el océano atlántico; su distribución espacial y su morfología se estudiaron para aprovechar las vistas, el sol, proteger la terraza del viento y así poder utilizarla tanto en invierno como en verano.

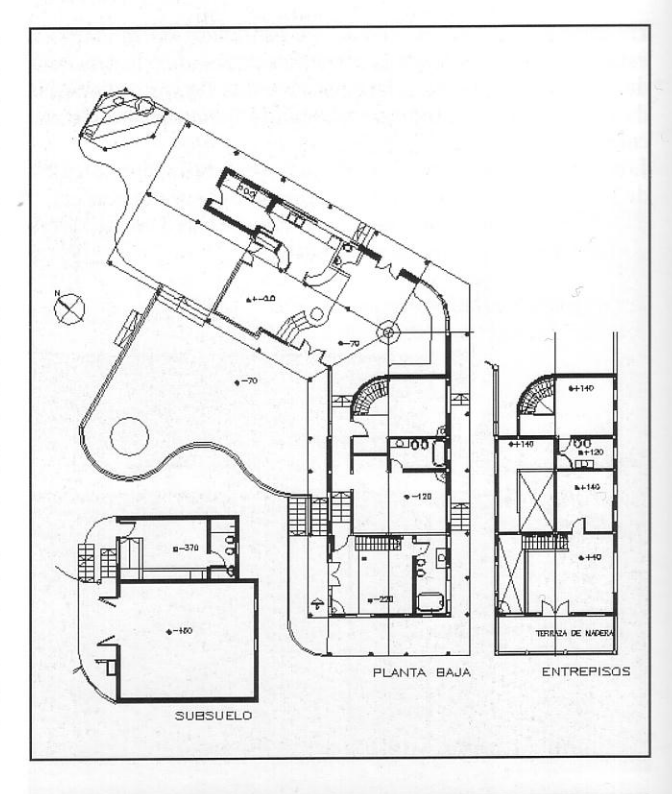
La técnica constructiva utilizada es predominantemente el adobe; dado el pronunciado desnivel del terreno la casa se desarrolla en diferentes niveles, llegando a tener tres.

El adobe fue utilizado como elemento portante en la zona de un nivel, cocina comedor parte del estar con muros de 25 cm de espesor. La zona de dormitorios en dos niveles fue realizada con estructura de madera, rolos de eucaliptos canteados y vigas antiguas de madera dura, entre las cuales se levantaron muros de adobes de 15 cm de espesor más 5 cm de barro y paja de trigo para mejorar la aislación térmica y lambriz doble de pino tratado con CCA generando un muro de 25 cm de espesor, bueno para soportar los vientos y lluvias del mar con un bajo mantenimiento.

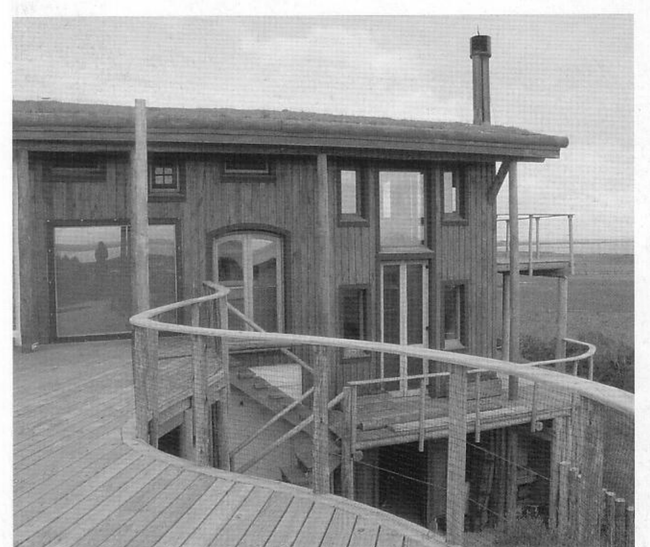
En la zona norte se realizó una calefacción natural colocando un vidrio en el exterior protegiendo el muro de adobes y generando un efecto trampa que calienta los mismos durante el día (Fig. 16.17-1).

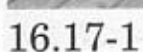
La casa posee la primera calefacción central por losa radiante de energía solar (6 paneles) y gas, permitiendo un considerable ahorro de combustible. Todos los techos de la casa son vivos.

Diseño: ECOAECO Kareen Herzfeld-Carlos Placitelli Montevideo, Uruguay
Conclusión: 2003
Superficie construida: 300m²








16.17-1

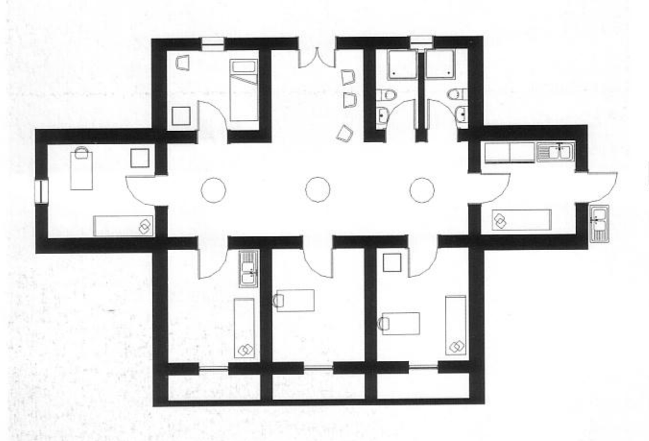


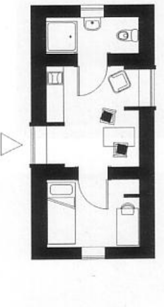


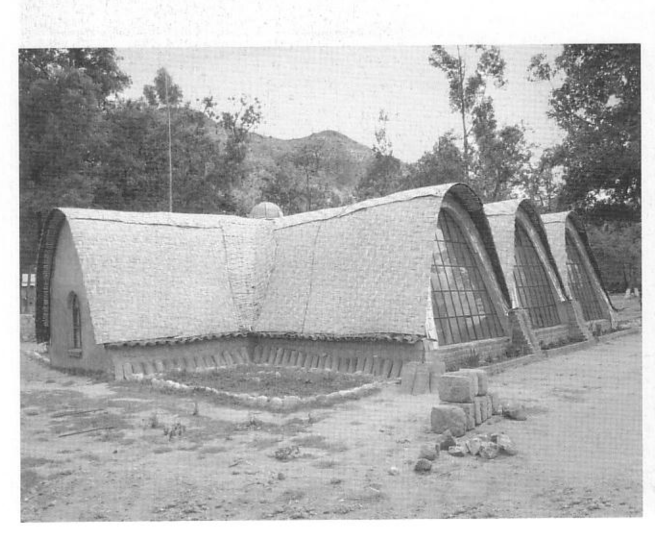
16.18 Posta sanitaria en la comunidad de Nino Yucay, Ayacucho, Perú

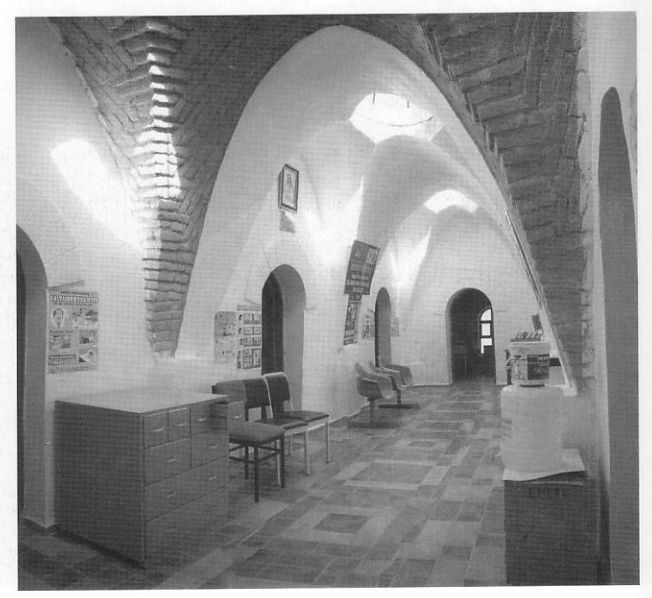
La Posta Sanitaria situada a 18 km de la ciudad de Ayacucho fue la primera infraestructura con tecnologías apropiadas construida por el Proyecto AMARES en el marco de su intervención en el mejoramiento de la capacidad resolutiva de los establecimientos de salud en zonas alejadas del Perú. El proyecto fue financiado por la Unión Europea.
El principio de intervención en las comunidades beneficiarias fue el desarrollo de capacidades locales como elemento básico de desarrollo y sostenibilidad. Para esto se planteó el empleo de materiales de construcción locales y técnicas constructivas que permitieran la participación activa de la comunidad en la construcción de infraestructuras de bajo costo.
Se emplearon los procesos constructivos de las infraestructuras de salud para la capacitación de los comuneros en técnicas constructivas que utilicen la tierra como material de construcción. La obra se ejecutó en su totalidad con mano de obra local.
El volumen de la infraestructura lo conforman cuatro bóvedas núbicas de 3 m de luz y 3,5 m de altura. Una de las bóvedas intercepta las otras tres dispuestas paralelamente una al lado de la otra. La vivienda para personal de salud se encuentra aislada de la Posta Sanitaria.
Los muros exteriores están protegidos con revoque de barro estabilizado con aceite de linaza. Las bóvedas fueron recubiertas con una capa impermeable, protegida por esteras tejidas en la comunidad. El interior se revocó parcialmente con cal caseína y en algunas salas se aplicaron ocres naturales.
La posta cuenta con un sistema de calefacción solar pasivo en la fachada este de la construcción que funciona a través de un invernadero que recolecta calor y lo transmite a los ambientes interiores.

Diseño: Alexander Fischer
Conclusión: 2004
Superficie construida: 188 m²









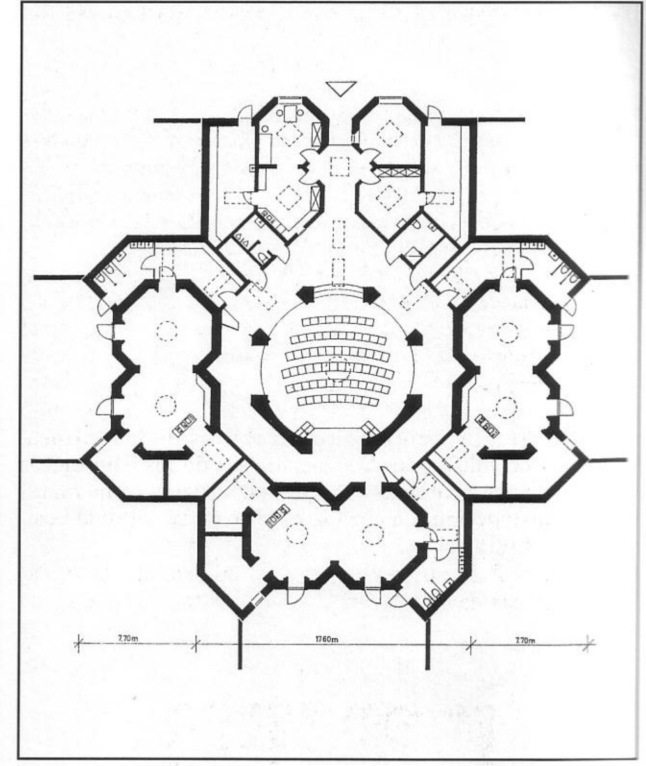
16.19 Guardería infantil, Sorsum, Alemania

La guardería tiene una cúpula central sobre un hall multiuso con una luz libre de 10 m, construida con bloques de barro extruido. Su espesor es de sólo 30 cm (12 pulgadas). Cada uno de los tres grupos de espacios está cubierto por dos cúpulas que se interceptan en un arco central (Fig. 16.19-4). Las cubiertas de los espacios laterales y pasillos se construyeron mediante una estructura de madera. La mayoría de los muros exteriores tienen terraplenes de tierra. Toda la edificación está cubierta por una capa de 15 cm de tierra y hierbas silvestres.

El diseño muestra una integración armoniosa con el paisaje y es energéticamente muy eficiente.

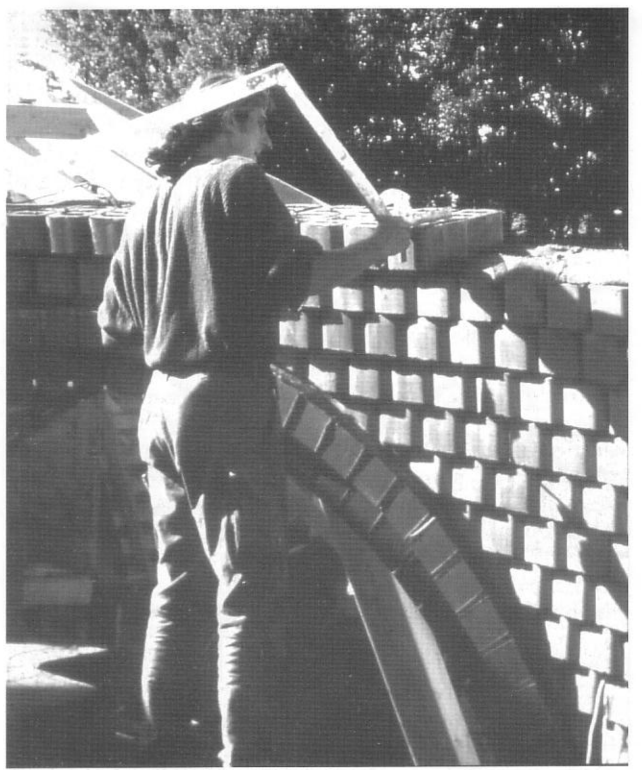
Los bloques de barro fueron extruidos en una ladrillera y tienen una forma especial redondeada que da un buen efecto acústico por la distribución del sonido. Además la ligera inclinación de los bloques ofrece un efecto que elimina la convergencia de las ondas sonoras (Fig. 16.19-7).

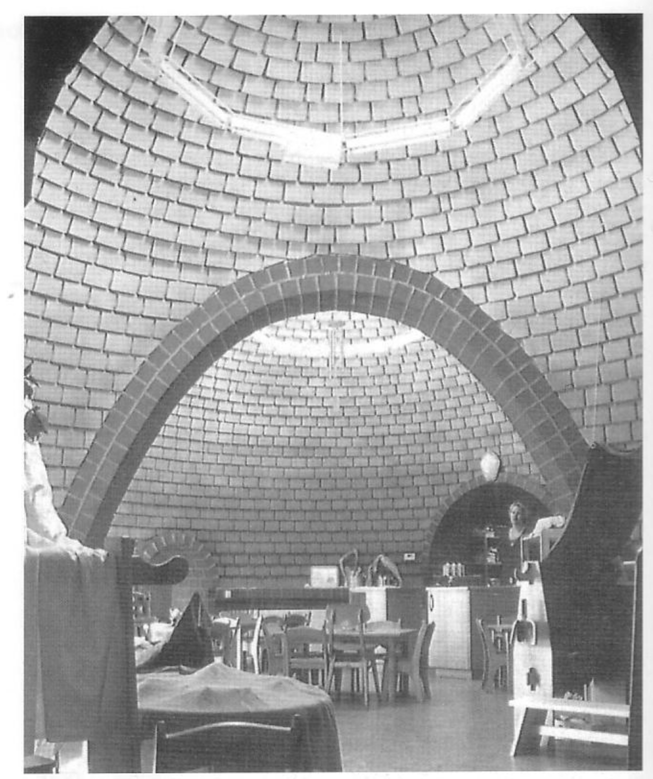
Diseño: Gernot Minke, Kassel, Alemania
Conclusión: 1996
Superficie construida: 595 m²



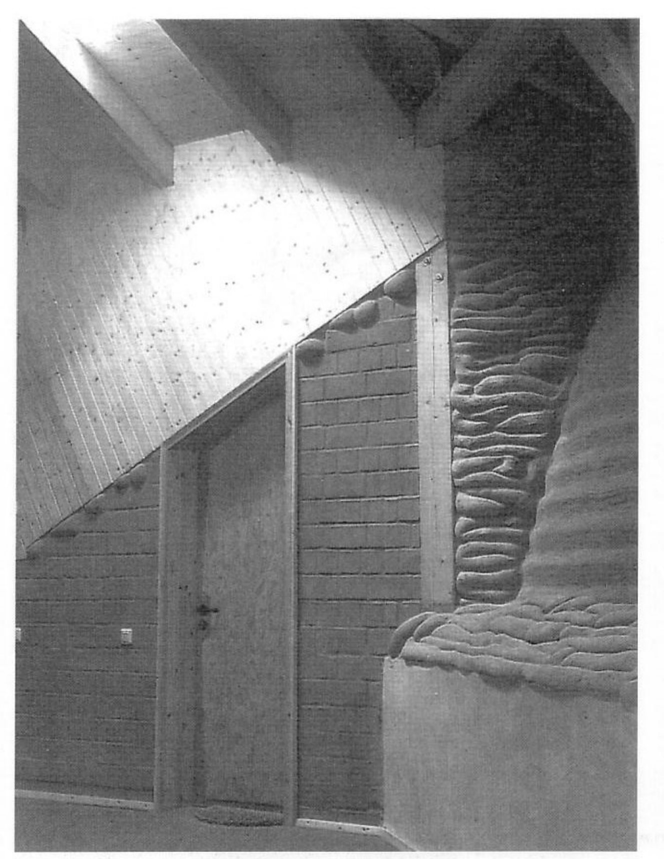
16.19-1

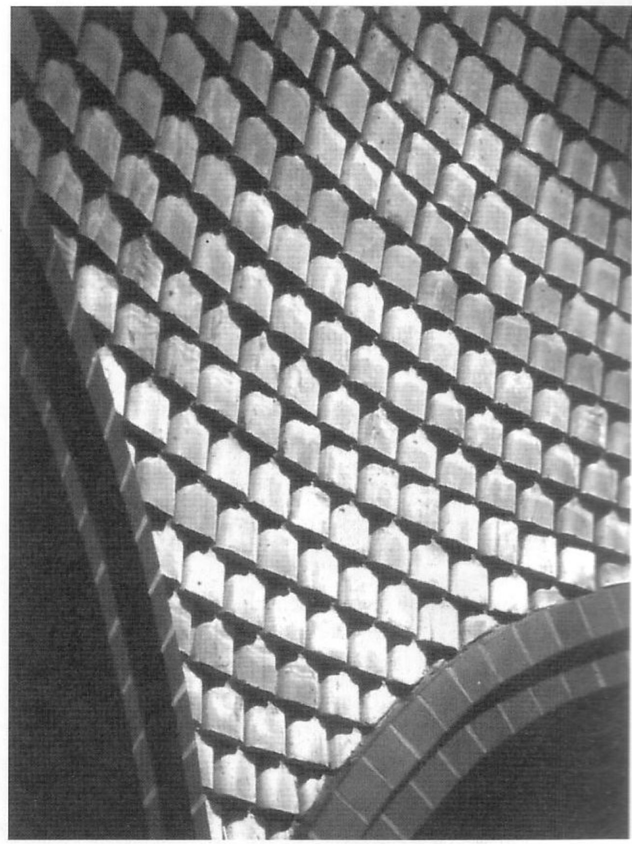
16.19-2

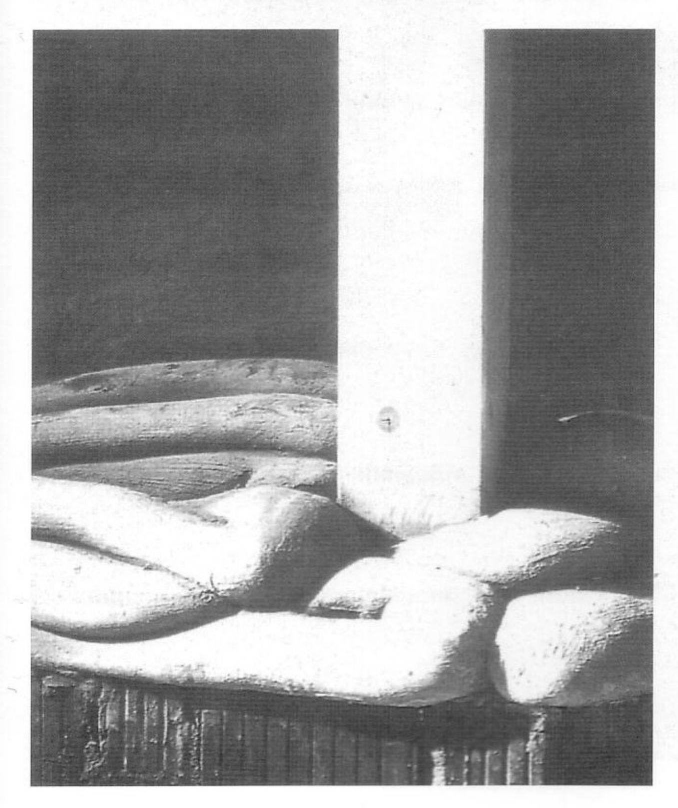

16.19-3


16.19-4

16.19-5





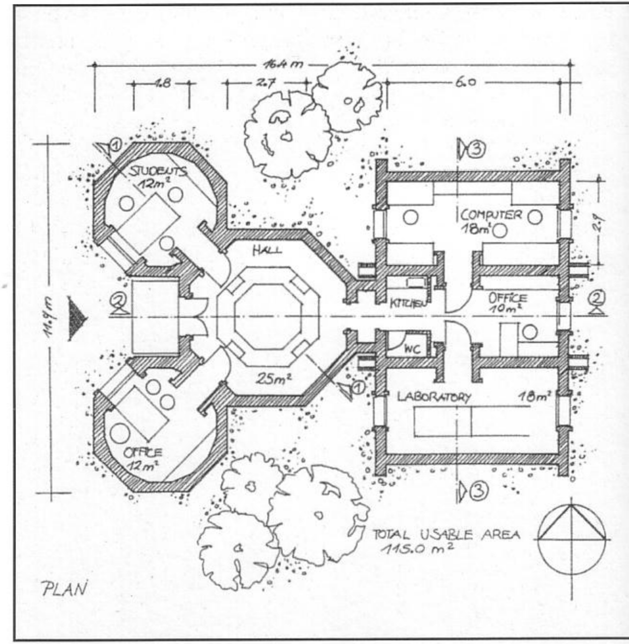


Arriba:
16.19-6, 16.19-7

Izquierda:
16.19-8

16.20 Oficina, Nueva Delhi, India

Esta oficina fue construida para demostrar que espacios construidos con bóvedas y cúpulas de bloques de suelo conducen hacia un mejor clima interior y pueden ser más económicos que las edificaciones tradicionales con cubiertas planas de hormigón.
El proyecto se construyó como parte de un proyecto de investigación y desarrollo financiado por la agencia alemana gate/gtz.
La edificación provee espacio de oficina y laboratorio a un grupo de investigadores, con un área útil de 115 m².
El vestíbulo central actúa como espacio multiuso para seminarios, encuentros y exposiciones.
Está cubierto por una cúpula con una luz libre de 5.40 m construida con bloques de suelo, producidos con una prensa manual.
Las tres cúpulas se construyeron con bloques de suelo, utilizando una guía rotatoria (Fig. 16.20-3), desarrollada por el FEB (ver sección 14.7.7).
Para la calefacción y el aire acondicionado se instaló un sistema de túnel de aire. Debido al clima existente los espacios deben ser enfriados de abril a septiembre y calenta-

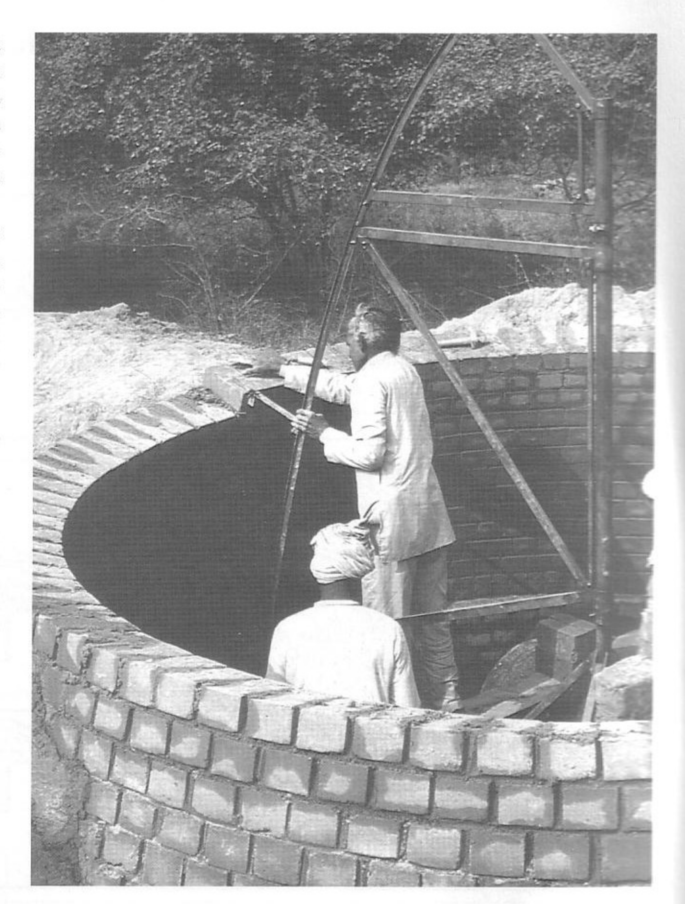


16.20-1

16.20-2

dos de diciembre a febrero. Para ello se instaló un sistema de un túnel de cerámica desde donde se impulsa aire a temperatura ambiente con dos ventiladores. El túnel tiene una profundidad de 3.50 m, donde la temperatura de la tierra se mantiene casi constante a 25 grados, que es la temperatura ambiental media anual. Con este sistema se puede elevar la temperatura en invierno y rebajarla en verano. El ahorro de energía en relación a una edificación con aire acondicionado es de 38,000 kw/h al año lo que representa 2/3 del valor total. Los ahorros en los costos de la edificación en comparación con una convencional de cubierta plana de hormigón fueron del 22%.

Diseño y supervisión: Gernot Minke, Kassel, Alemania
Colaborador: R. Muthu Kumar, Nueva Delhi, India
Concepto energético: N.K. Bansal, Nueva Delhi, India
Conclusión: 1991
Superficie construida: 115 m²



16.20-3

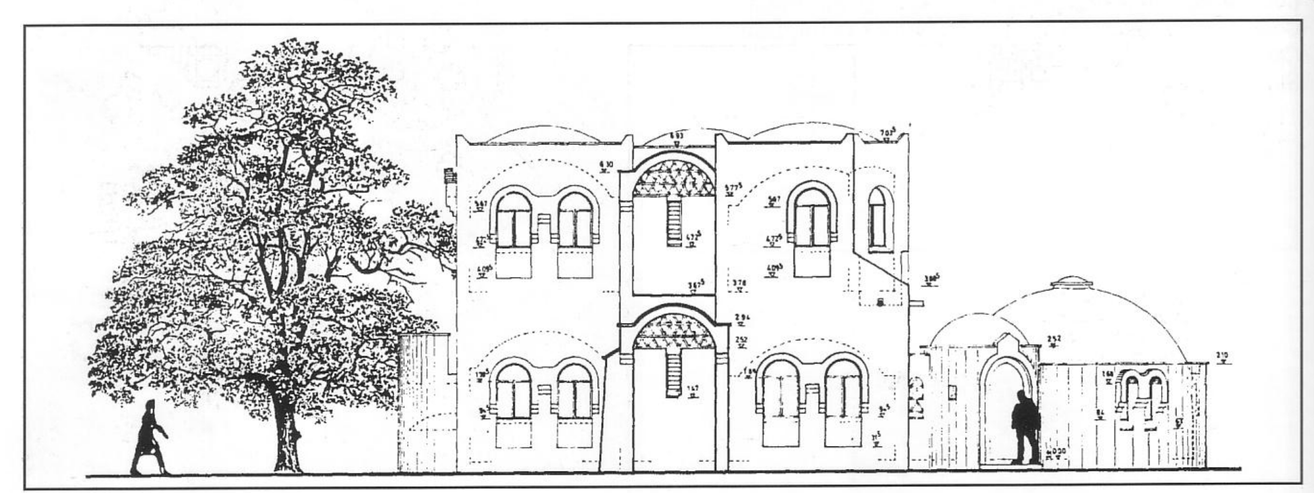
16.20-4

16.21 Instituto Panafricano, Ouagadougou, Burkina Faso (Alto Volta)

Los 5.000 m² del centro de investigación y capacitación incluye 3 grupos distintos de edificaciones: un centro de enseñanza y administración que incluye librería y restaurante; albergue para 72 estudiantes y viviendas para 9 profesores (Figs. 16.21-1, 16.21-2).
Todos los muros, bóvedas y cúpulas se construyeron con bloques de suelo estabilizado, elaborados en el sitio con tierra local. Las bóvedas y las cúpulas se construyeron con la técnica núbica sin encofrados. Las superficies exteriores se revocaron con barro estabilizado con cal y cemento.

El proyecto se inició en 1981 y se termino en 1984. En 1992 recibió el Premio de Arquitectura Aga Khan.

Diseño: Philippe Glauser, A.D.A.U.A
Ingeniero: Ladji Camara
Financiamiento: EZE (Evangelische Zentralstelle für Entwicklungshilfe Bonn Bad Godesberg), DDA (Direction de la coopération en développement et de l'aide humanitaire) Berna, IPD (Institut Panafricain pour le Développement).



16.21-1



16.21-2

C

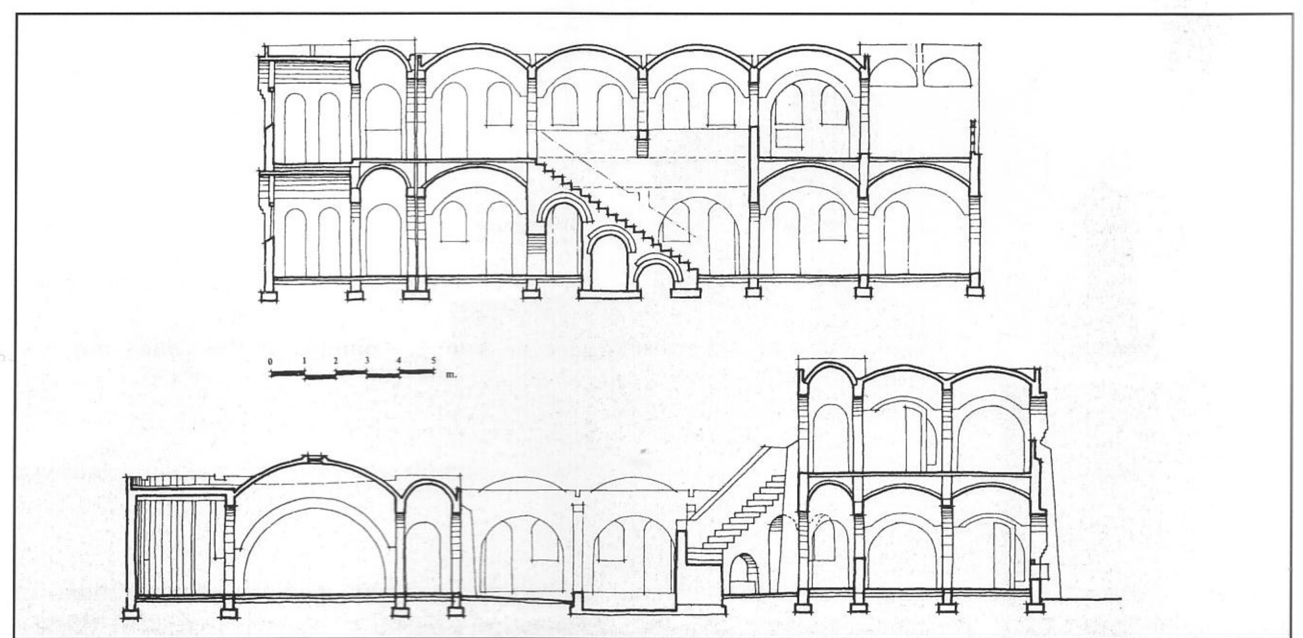
A

B

A. Teaching and administration, library and restaurant
B. Students' housing
C. Professors' housing

0 50 m.

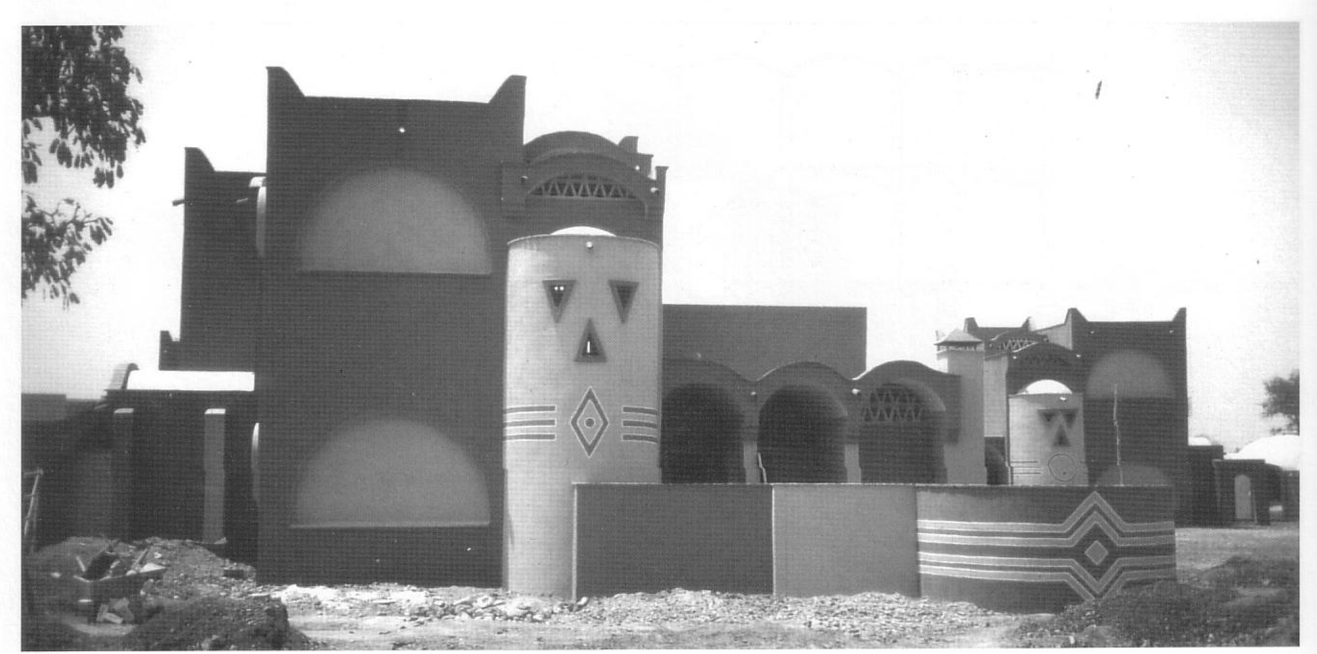
16.21-3



16.21-4

1 0 5 m.

16.21-2



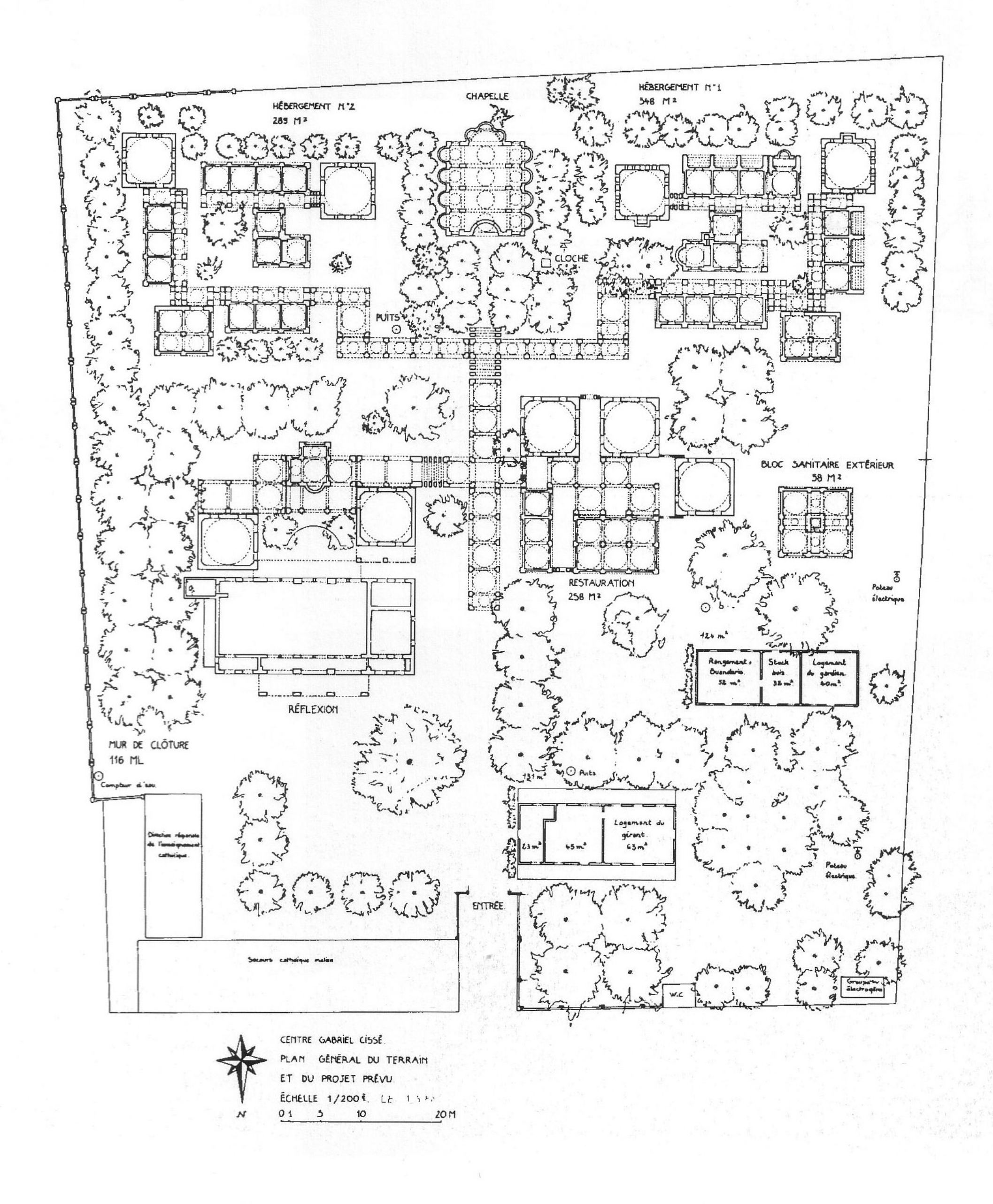
16.21-6

16.22 Centro educativo, Seguo, Mali

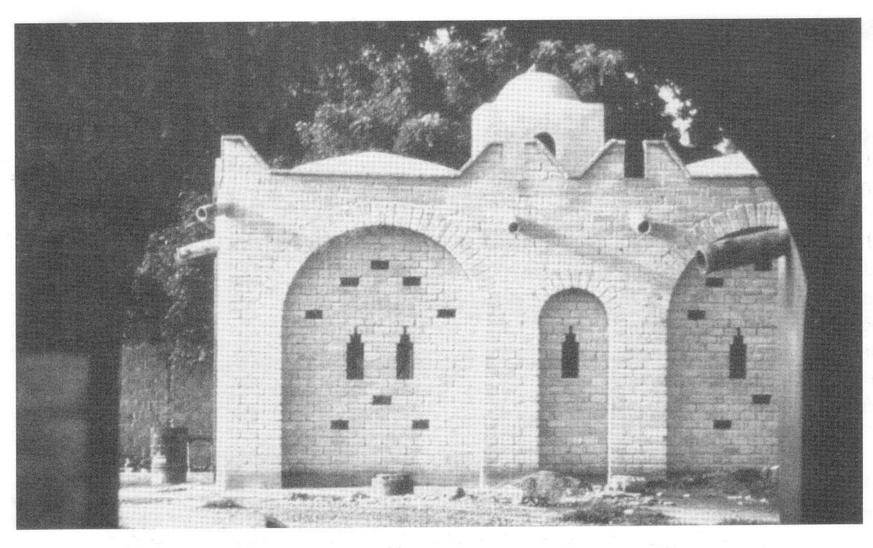
Caracterizado por espacios cubiertos por cúpulas, muros de bloques de suelo vistos y captadores de viento favoreciendo la ventilación natural, el proyecto fue auspiciado por el Vaticano, el arzobispado Segou, la Fundación de Francia, la Fundación pour le Progrès de l'homme, CCFD y Misereor.
El centro provee alojamiento para 50 personas, un centro de conferencia un restaurante y una pequeña capilla.
Los bloques de suelo se estabilizaron usando 4% de cal y 2% de cemento y fueron producidos con una prensa motorizada de bloques de suelo (ALTECH PACT 500).

Del costo total de la producción de los bloques, el costo de los estabilizadores (cal y cemento) fue del 25% y el de mano de obra 21%.

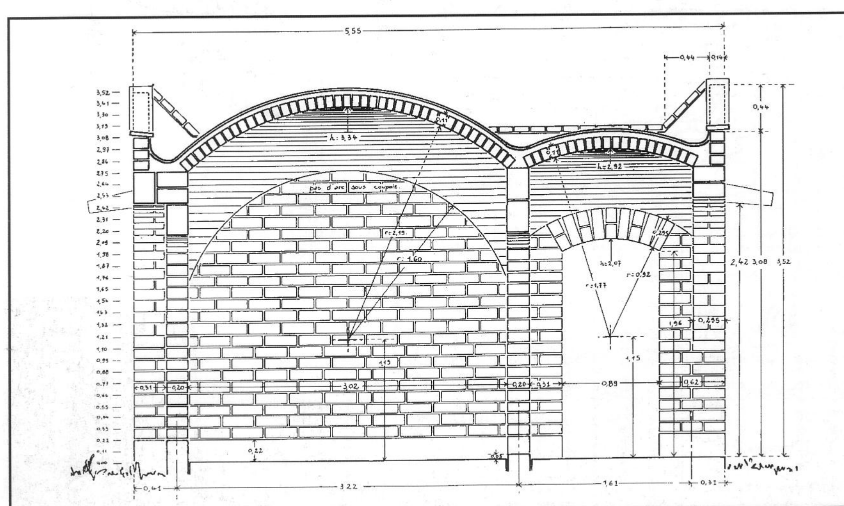
Diseñadores: Nicolas Widmer, Alain Klein
Conclusión: 1988
Superficie construida: 1600 m²



16.22-1



16.22-2



16.22-3

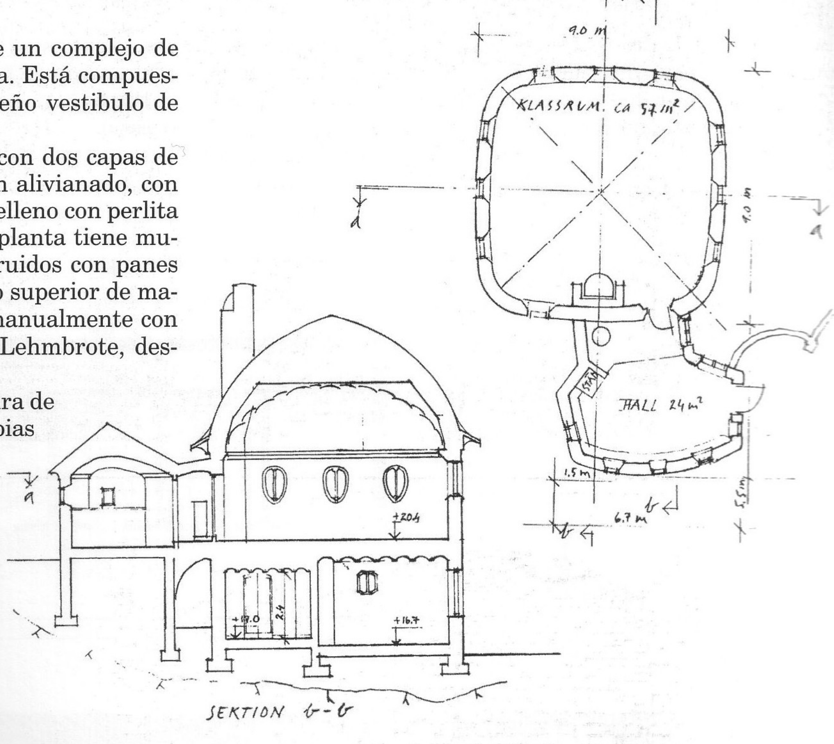


16.22-4

16.23 Escuela Solvig, Järna, Suecia

La edificación de dos plantas es parte de un complejo de edificaciones de una escuela antroposofica. Está compuesta por dos aulas, cada una con un pequeño vestibulo de entrada.
Los muros del sótano están construidos con dos capas de 15 cm de espesor de bloques de hormigón alivianado, con una separación de 20 cm, espacio que se relleno con perlita para el aislamiento térmico. La primera planta tiene muros portantes de 50 cm de espesor construidos con panes de barro, los muros tienen un encadenado superior de madera. Los panes de barro se elaboraron manualmente con suelo arcilloso según la técnica Dünner-Lehmbrote, descrita en la sección de 8.3.
La cubierta se construyo con una estructura de madera aislada con turba y cubierta con ripias de piedra.
Los espacios se calientan por medio de chimeneas.

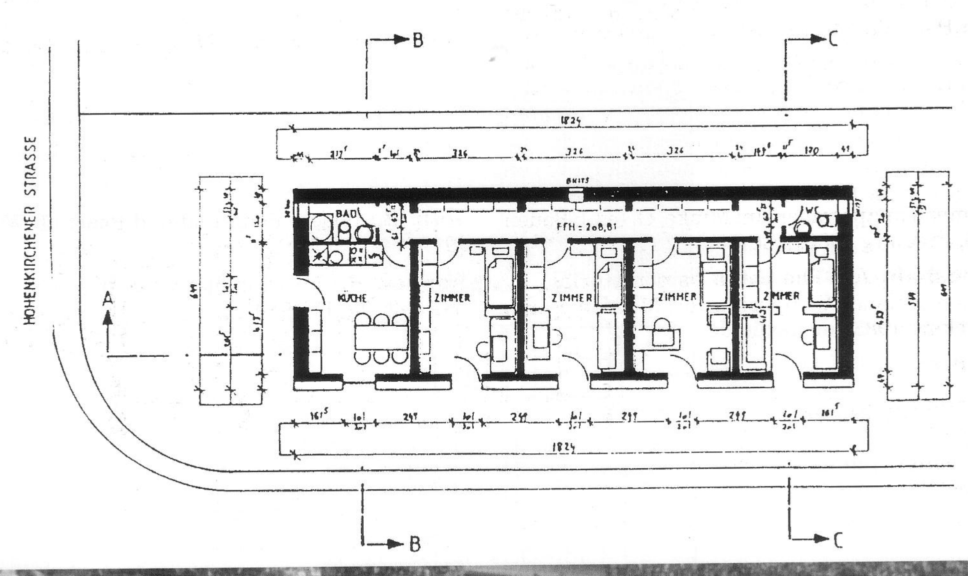
Diseño: Mats Wedberg, Suecia
Conclusión: 1993
Superficie construida: 140 m²



16.24 Residencia de estudiantes, Kassel, Alemania

La residencia se diseñó y construyó por estudiantes de arquitectura de la Universidad de Kassel. Dos edificios similares se ubicaron en un lote estrecho, cada uno con cuatro departamentos, una cocina y baño común.

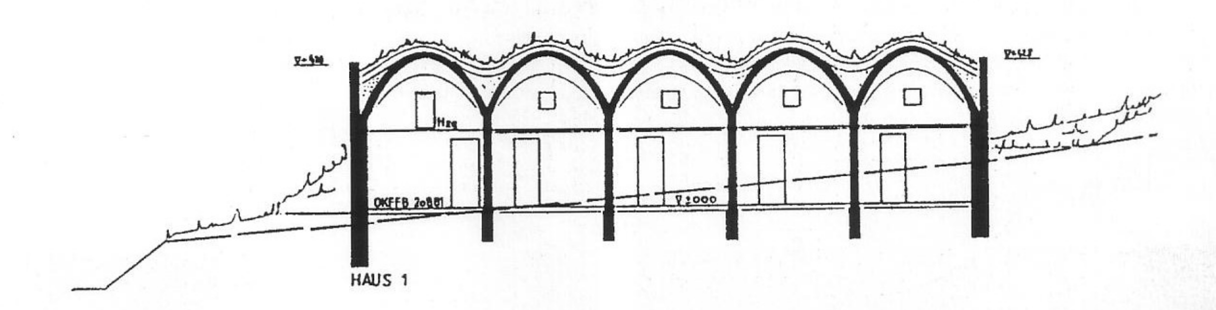
Los espacios se cubrieron por una bóveda inclinada. Su altura varia de 4m a 5 m. Una parte posee una galería permitiendo una separación del espacio habitacional del de trabajo.



Las bóvedas tienen la sección de una catenaria invertida y están construidas con la técnica nubica con bloques de suelo no estabilizado. Los bloques tienen una forma cónica (con el objetivo de ahorrar mortero) y se producieron en una fábrica.
La fachada sur acristalada al lado de las puertas fue construida con un aislamiento térmico transparente que calienta un muro de bloques de tierra pintado de negro. Este método de ganancia térmica pasiva puede ahorrar gran parte de la energía para la calefacción.

La cubierta se cubrió con un aislamiento térmico de 20 cm de espesor (lana mineral) sellada con una membrana de fibra de vidrio recubierta con poliolefino de 2 mm de espesor sobre la cual actúan 15 cm de tierra como sustrato para un techo verde de hierbas silvestres.

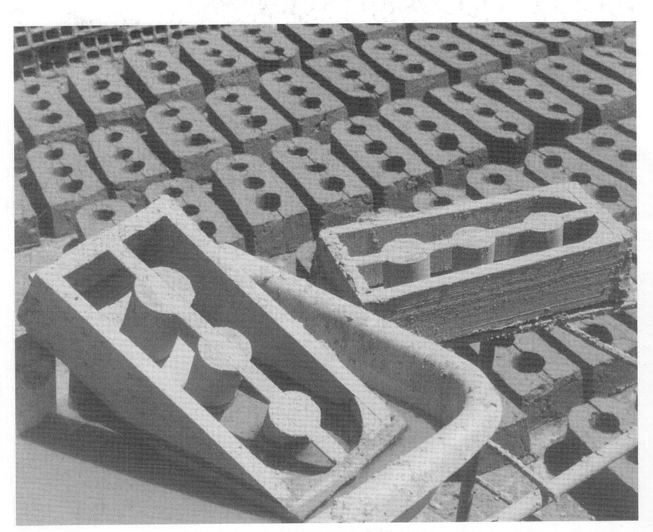
Diseñadores: Jörn Gutbier, Tobias Weyhe, Ralf Zumpfe
Conclusión: 1995
Superficie construida: 95 m² + 25 m² (galería)



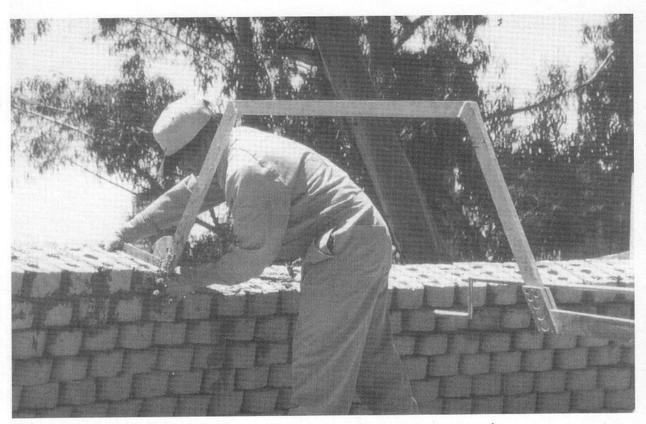
16.25 Centro Cultural, La Paz, Bolivia

Este proyecto se llevo a cabo en el marco de un convenio entre la Embajada de la República Federal de Alemania, el Goethe-Institut, La Alcaldía de la cuidad de La Paz y la Universidad de Kassel, Alemania.
Fue la contribución alemana a la proclamación de La Paz como Capital de la Cultura Latinoamericana 1999.
El Centro Cultural, debido a su dimensión y estructuración marca un signo importante intercultural para el cambio de perspectiva en Bolivia hacia su propia tradición en la construcción andina con adobe.
La cúpula de 8.80 m de luz y 5.65 m de altura libre se construyó con 9400 adobes elaborados a mano con un molde especial con el que se fabrican adobes huecos con bordes redondeados que optimizan la acústica del espacio.
La construcción de la cúpula se ejecutó con una guía rotatoria elaborada y experimentada en el Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales (FEB), de la Universidad de Kassel, Alemania.
La cúpula se recubrió con una tela de fibra de vidrio y una pintura con polvo de aluminio para reflejar los rayos del sol (Kemperol).
Asimismo, esta cúpula única hasta el momento en Latinoamérica, es una combinación de la tradición local de construcción con adobes y la aplicación de un concepto innovador de diseño con tierra.

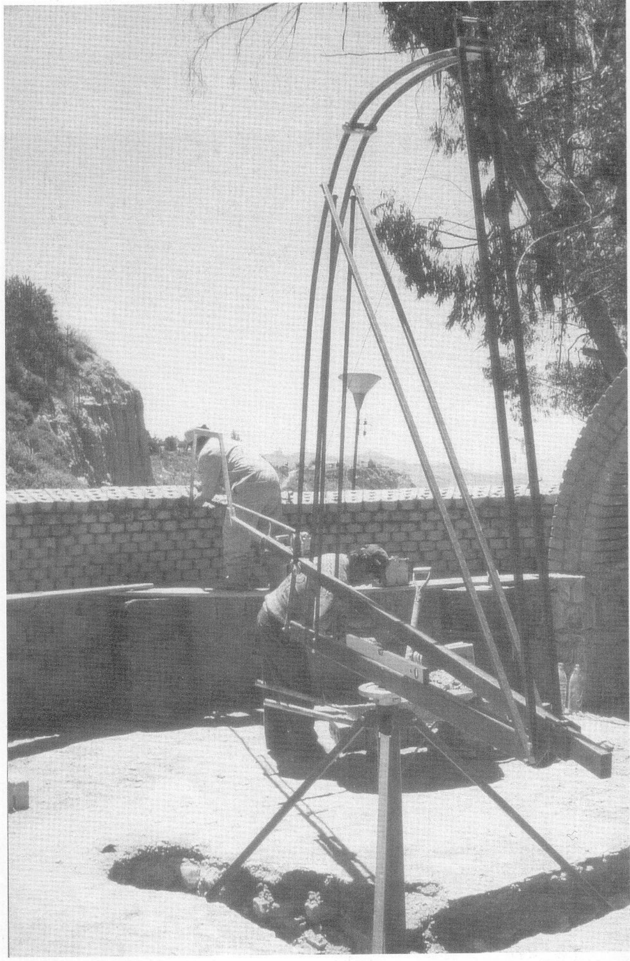
Diseño: Gernot Minke
Supervisión: Alexander Fischer
Conclusión: 2000
Superficie: 170 m²
Area: 75 m²



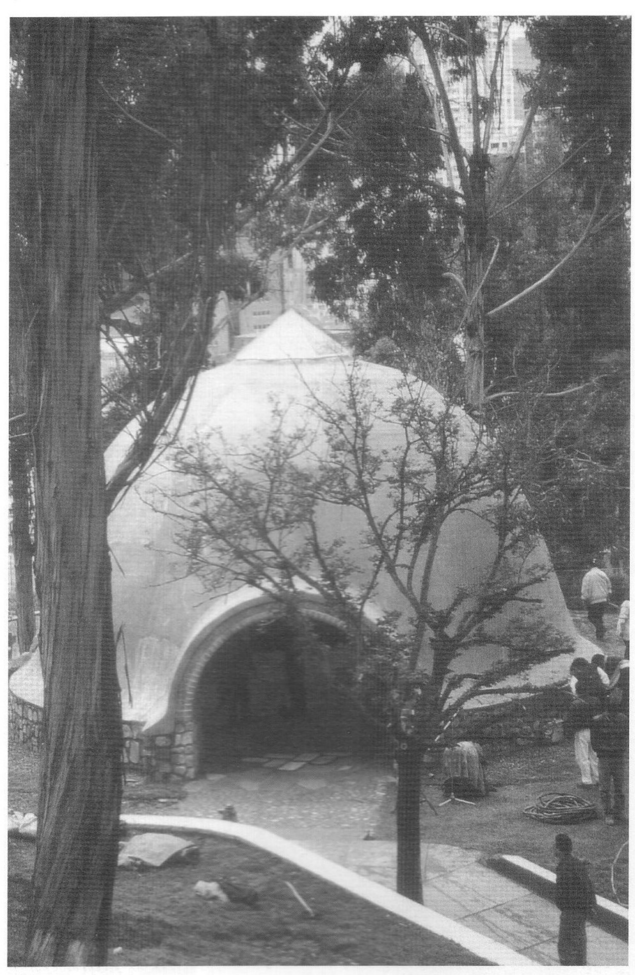
16.25-1 Adobes especiales elaborados a mano



16.25-2 Colocación de los adobes con la guía rotatoria



16.25-3 Guía rotatoria



16.25-4 Vista exterior



16.25-5 Vista interior

16.26 Centro de salud, Vöhl, Alemania

El edificio de más de 5.000 m² de bóvedas y cúpulas de bloques de tierra (adobes), será uno de los más grandes de nuestro tiempo. La cúpula central con una luz libre de 13 m, cubre un hall multiuso, tiene un espesor de solo 30 cm debido a su forma estructural optimizada (ver sección 14.7.7). Todos los espacios están cubiertos con bóvedas o cúpulas. La edificación está cubierta con techos verdes con hierbas silvestres. La Fig. 16.26-1 muestra una maqueta, el inicio de la construcción está previsto para el año 2002. La sección del área central de área de 600m² con espacios con cúpulas para seminarios, yoga, música y meditación se muestra en la Fig. 16.27-3.

Diseño: Gernot Minke, Kassel, Alemania
En planificación
Superficie útil: 4500m²
Muros exteriores: bloques huecos alivianados, 36,5 cm
Muros interiores: bloques de suelo no estabilizados
Bóvedas y cúpulas: bloques de suelo no estabilizados
Cubierta: 20 cm aislamiento térmico, 15 cm de tierra con vegetación



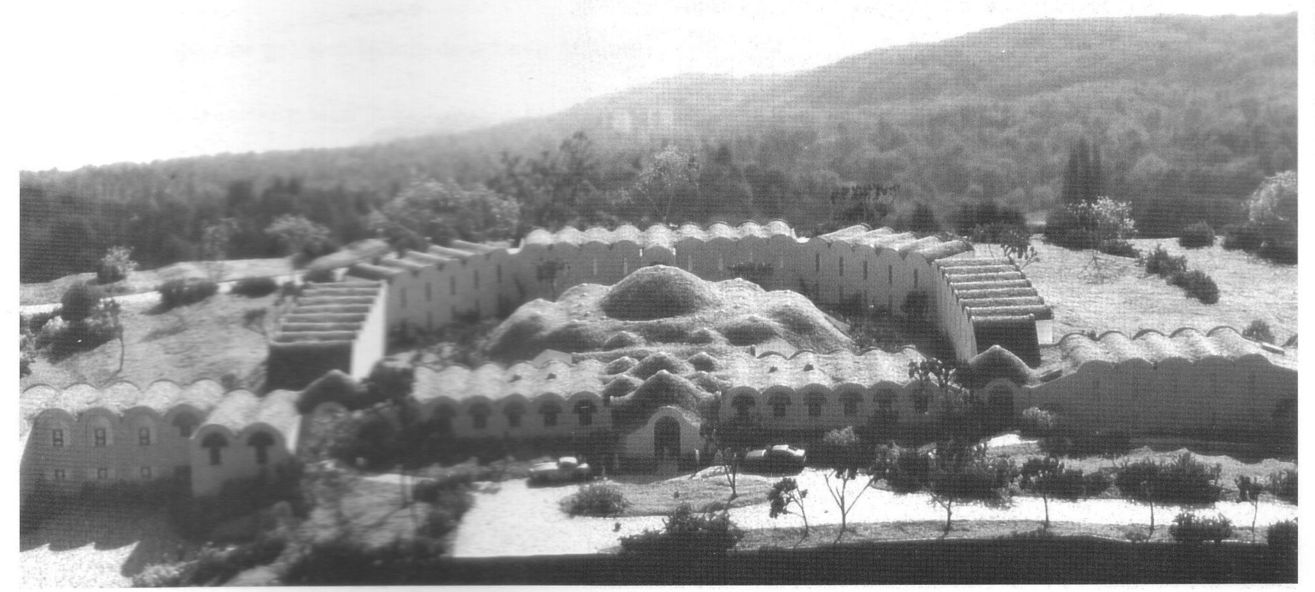
16.26-1

SCHNITT A-A

Untergeschoß
Gärtnerei Bioladen
Personal
Heizung
Lehrküche
Schwimmbad

Erdgeschoß
Küche
Restaurant
WC
Hausmeister
Wäsche
Massagepraxis
Laden
Verwaltung
Beh.
Heilprakt.
Ther.
Hydrotherapie
Sauna
Erste Hilfe
WC
WC
Arztpraxen
Wecken
Personal
Putzraum
Seminar
Seminar
Seminar
Seminar
Seminar
Mehrzweckhalle
Meditation
Hof
2-Bettzimmer
2-Bettzimmer
Streuobstwiese
Streuobstwiese
N
Terrasse
Terrasse
Terrasse
Terrasse
1-Bettzimmer
1-Bettzimmer
1-Bettzimmer
1-Bettzimmer
Gruppenraum
Gruppenraum

16.26-2



16.26-3

17. Perspectivas futuras

En la sociedad acomodada de Europa central la arquitectura en tierra no podría jugar el rol dominante que ya juega en sectores de Estados Unidos y Australia. Debido a las condiciones climáticas y a las rígidas normas en lo que respecta al aislamiento térmico para la construcción en Europa central y del norte, los muros exteriores no podrían ser construidos solamente con barro y requieren de aislamiento externo adicional. Por otro lado, en climas cálidos y moderados, los muros exteriores pueden ser construidos con barro sin recubrimiento adicional. Estos proveen un mejor clima interior y pueden ser más económicos que muros construidos con piedra, ladrillo u hormigón.
A pesar de este hecho, encontramos en Europa una tendencia creciente a construir con tierra. Esto debido a un aumento de la conciencia ambiental, a la preocupación por el innecesario gasto energético y el consumo de los recursos que se requieren para la fabricación de materiales industriales cuya elaboración provoca polución y también debido al deseo de vivir en un medio interior balanceado.
En países en vías de desarrollo donde más de la mitad de la población habita en viviendas de tierra, se construyen las residencias modernas comúnmente con materiales industriales como ladrillos, hormigón y paneles prefabricados de diferentes composiciones. Asimismo, se reconoce que los crecientes requerimientos de vivienda no pueden ser resueltos empleando materiales industrializados debido a la falta de capacidad de producción y los medios económicos requeridos. La única solución que parece factible es utilizar materiales naturales localmente disponibles, mano de obra y herramientas apropiadas así como una integración de las técnicas de autoconstrucción para la que el material tierra es ideal.
En estos países, especialmente en aquellos de climas cálidos y moderados, existe ya una cantidad creciente de viviendas construidas con adobes o bloques de suelo estabilizado.
En dichos lugares, las viviendas de bajo costo, en las que la estructura de la cubierta representa un tercio del costo total de la edificación, el potencial para el uso de bloques de tierra para construir bóvedas y cúpulas es muy alto, proporcionando además un mejor clima interior debido a sus características térmicas, mejor ventilación y aislamiento contra el ruido.
Técnicas de construcciones con tierra desarrolladas recientemente y ensayadas exitosamente esperan ser adaptadas e implementadas en otros países donde no han sido aún ensayadas. Se deben desarrollar lineamientos y cursos de entrenamiento para difundir estas técnicas.
Debe demostrarse no solo con residencias y proyectos especiales de viviendas de bajo costo sino además con edificaciones públicas como hospitales, escuelas y oficinas, que la tierra utilizada correctamente es un material disponible, duradero, económico y con grandes posibilidades.
Puede ser una respuesta a los grandes requerimientos de vivienda así como una respuesta alternativa a una a una nueva conciencia en la arquitectura.

La construcción de muros de adobes secados al sol, continuara siendo una técnica dominante ya que puede ser ejecutada por albañiles en todas partes del mundo sin una calificación especial. Las cúpulas y bóvedas de adobes son una alternativa viable, económica y estructuralmente posible para las usuales viviendas de cubiertas planas o inclinadas de planchas metálicas, asbesto-cemento u hormigón armado. Estas podrán ser utilizadas con mas frecuencia y seguridad cuando los conocimientos sobre sus técnicas constructivas sean más difundidos.
La técnica del tapial es una técnica apropiada para climas moderados y cálidos y es también económica en países desarrollados, cuando se emplea el equipamiento adecuado y tecnología mecanizada.
En países industrializados de climas moderados se empleara cada vez mas elementos de barro alivianado prefabricado y revoques de barro en interiores. En Alemania, Suiza y Holanda muchas empresas que se dedican a la elaboración de productos de tierra han encontrado un mercado creciente en los últimos años.

18. Referencias bibliográficas

Aslam, M.; Satiya, R.C.: A Technique of Waterproofing Mud Wall. Building Materials Note No. 14, Central Research Institute, Roorkee, Indien

Balassa, J.; Ortutay, G.: Ungarische Volkskunde, in: Ethnographia, Budapest 1977, p.329-364

Bardou, P.; Arzoumanian, V.: Archi de terre, Paris 1978

Beckert, J.: Wirkung von Verunreinigungen der Raumluft auf den Menschen, in: Beckert et al. (ed.): Gesundes Wohnen, Düsseldorf 1986

Berglund, M.: Rammed Earth, in: Fine Homebuilding, No.11, 1982, p.21-25

Behm-Blanke, G.: Die altthüringische und frühmittelalterliche Siedlung. Weimar, Berlin 1954

Beidatsch, A.: Wohnhäuser aus Lehm. Berlin 1946

Boemans, U.: Sanierung und Umnutzung einer Fachwerkscheune (Kassel FB 12) 1990

Boenkendorf, U.; Knöfel, D.: Les Mortiers d'Enduit dans la Construction en Pan de Bois, in: Proceedings of the International Congress on the Conservation of Stone and other Materials, Unesco/Rilem, Paris, 29.6. - 1.7.1993

Bourgeois, J.-L.: Traditional adobe is illegal in New Mexico, in: Adobe Journal (Albuquerque, USA) No.5, 1991, p.47

Bühring, J.: Putz und Farbe an Fachwerkbauten, in: Arbeitsgemeinschaft Historische Fachwerkstädte in Hessen und Niedersachsen (ed.): Arbeitsgruppe Bautechnik, No.3

Cointeraux, F.: Schule der Landbaukunst. Hildburghausen 1793

CRATerre: Construire en terre. Paris 1979

CRATerre: Compressed Earth Block: Production Guidelines. GTZ, Eschborn 1991

CRATerre: Modernité de l'architecture de terre en Afrique. Grenoble 1990

Dehn, W.: Die Heuneburg beim Talhof unweit Riedlingen. 1957

Department of Housing and Construction (ed.):

EBS Bulletin No.5: Earth-wall Construction. Canberra, Australia 1981

Dalokay, Y.: Lehmflachdachbauten in Anatolien. Dissertation TU Braunschweig 1969

Dethier, J. (ed.): Lehmarchitektur. München 1982

Dhonau, H.; Menschel, Th. et al. (ed.): Die Felke-Kur. Schriftenreihe der Ärztlichen Arbeitsgemeinschaft für Felketheorie, No 2, Sobernheim

Diez, E.: Persien, Islamische Baukunst in Churasan. Hagen/Darmstadt/Gotha 1923

Donat, P.: Haus, Hof und Dorf in Mitteleuropa vom 7.-12. Jahrhundert. Berlin 1980

El-Hakim, O.: Nubian Architecture, Cairo 1993

Elias, P.: Le Bilan Energetique de Quelque Parois de Batiment, in: Cahier du Centre Scientifique et Technique du Batiment No.213, Oct.1980

Evans, J.: Lorena Owner-built Stoves. Stanford, USA 1979

Fathy, H.: Architecture for the Poor. Chicago and London 1973

Fathy, H.: Natural Energy and Vernacular Architecture. Chicago/London 1986

Fauth, W.: Der Lehm als Baustoff, in: Reichskuratorium für Wirtschaftlichkeit (ed.): Bauwirtschaftlicher Siedler-Lehrdienst (Berlin), No.1 1933

Fauth, W.: Der praktische Lehmbau. Wiesbaden 1946

Gardi, R.: Auch im Lehmhaus läßt sich's leben. Graz 1973

Gerner, M.: Farbiges Fachwerk. Stuttgart 1983

Gilly, D.: Praktische Abhandlung aus der Lehmbaukunst betreffend den Bau der sogenannten Lehm- oder Wellerwände wie man dieselben dauerhaft mit wenigen Kosten und einer wahren Holzersparung aufführen könne. Berlin 1787

Gilly, D.: Beschreibung einer vorteilhaften Bauart mit getrockneten Lehmziegeln. Berlin 1790

Gilly, D.: Handbuch der Land-Bau-Kunst. Braunschweig and Halle 1800 and 1822

Grandjean, E.: Wohnphysiologie. Zürich 1972

Griselini, F.: Versuch einer politischen und natürlichen Geschichte des Temeswarer Banats in Briefen an Standespersonen und Gelehrte. Wien 1780

Güntzel, J.G.: Das Dünner-Lehmbrote-Verfahren, in: Minke, G. (ed.): Bauen mit Lehm, No. 1. Grebenstein 1984, p.46-51

Güntzel, J.G.: Zur Geschichte des Lehmbaus in Deutschland (Dissertation, Gesamthoch-schule Kassel, FB 12). Staufen 1988

Hacheney, F.: Levitiertes Wasser. Andechs 1992

Hafezi, M.: Bericht anläßlich des 2.Fachwerk-Expertentreffens, Celle 1993 (not published)

Haider, B.: Baumaterial und Radonbelastung von Häusern, in: Wohnung + Gesundheit (Neubeuern), No.12/93, p.40

Heimstätte Dünne (ed.): Ein alter Baumeister und was wir von ihm gelernt haben. Dünne

Hill, C.: On the Construction of Cottages, in: Journal of the Royal Agricultural Society (1843), p.356-369

Hölscher, W.; Wambsganz, L.; Dittus, W.: Die baurechtliche Regelung des Lehmbaus und des landwirtschaftlichen Bauwesens - Lehmbauordnung. Berlin 1947

Hofmann, U.; Schembra, F.W. et al.: Die Trockenbiegefestigkeit von Kaolinen und Tonen, in: Berichte der Deutschen keramischen Gesellschaft, Bd.44 (1967), H.4, p.131-140

Houben, H.; Guillaud, H.: Earth Construction Primer. Brüssel 1984

Ingles, O.G.; Metcalf, J.B.: Soil stabilisation. Sydney 1972

Ingles, O.G.; Lim, N.W.: Ferroclay - A New Method for the Stabilisation of Soils, in: Proceeding, Conferencia Internacional de Mecanica de Suelos, Mexico City 1982

Ingles, O.G.: Soil Stabilisation, in: Bell, F.G. (ed.): Ground Engeneer's Reference Book, Chapter 31. Sydney 1983

Institut für wissenschaftlichen Film, Göttingen (ed.): Feldbrand-Ziegelei. Dokumentarfilm 1965

International Labour Office (ed.): Small-scale manufacture of stabilised soil blocks. Genua 1987

Karsten, R.: Bauchemie für Studium und Praxis, 7.edition. Haslach 1983

Keller, G.; Muth, H.: Natürliche Radioaktivität, in: Beckert et al. (ed.): Gesundes Wohnen. Düsseldorf 1986

Knöfel, D.: Bautenschutz mineralischer Baustoffe. Wiesbaden, Berlin 1979

Jain, J.P.; Kulshrestha, R.P.; Singh, I.: A new Technique of Making Thatch Fire retardent. Technical Note. Central Building Institute Roorkee, Indien, Sept.1978

Kremers, H.: Außenputze für historische Gebäude, Aachen 1991 (ed.: Landesinstitut für Bauwesen und angewandte Bauschadensforschung Aachen)

Krünitz, J.G.: Oeconomische Encyklopädie....... Vol. 70. Berlin 1799

Künzel, H.: Die hygrothermische Beanspruchung von Außenputzen, in: Bauphysik (Berlin) H.4/1990, p.104-109

Langer, J.; Varecka, J.: Nase lidové stavby. Prag 1983

Lasius: Über die Erbauung der Erdhäuser oder die sogenannte Piséarbeit, in: Hamburgische Adreß-Comtoir-Nachrichten, Stück 22, p.169-172. Hamburg 1797

Leimer, H.-P.: Beitrag zur Bestimmung des wärme- und feuchtetechnischen Verhaltens von Bauteilen bei der Sanierung historischer Fachwerkgebäude. Dissertation HAB Weimar. Weimar 1991

Lutz, P.; Jenisch, R., et al.: Lehrbuch der Bauphysik. Stuttgart 1985

Manandhar, R.: Mud brick dome and vault construction ..., in: Proceedings First International earth sheltered buildings conference. August 1-6, Sydney 1983, p.371-375

Marmé, W.; Seeberger, J.: Der Primärenergieinhalt von Baustoffen, in: Bauphysik (Berlin), No.5, 1982, p.155-160 and No.6, p.208-214

McCann, J.: Clay and cob buildings. Aylesbury, Großbritannien 1983

McHenry, P.G.: Adobe and rammed earth buildings. New York 1984

Meingast, R.: Niedrigenergiehäuser in Lehmbauweise, in: Wohnung + Gesundheit (Neubeuern), 9/98, p.2

Meischeider, H.: Der Lehmbau. Lüneburg 1946

Mencl, V.: Lidová architektura v ceckoslowenska. Prag 1980

Middleton, C.F.: Build your house of earth. Victoria, Australia (revised edition) 1979

Miller, T.; Grigusch, E.; Schulze, K.W.: Lehmbaufibel. Weimar 1947

Minke, G.: Erdbebensichere Low-Cost-Bauten für Guatemala. Schriftenreihe der Arbeitsgruppe für Angepaßte Technologie, Gesamthochschule Kassel, Heft 3. Kassel 1980

Minke, G.: Earth sheltered buildings utilising tampered earth and plant stabilised earth as building materials, in: Proceedings first international earth sheltered buildings conference. August 1.-6., Sydney 1983, p.377-380

Minke, G.: Earthquake resistant low-cost houses utilising indigenous building materials and intermediate technology, in: Proceedings, International Symposium on Earthquake Relief in Less Industrialized Areas. Zürich, 28.-30. March 1984 (a)

Minke, G.: Lehmbauforschung. Schriftenreihe Fachbereich Architektur. Gesamthoch-schule Kassel, Heft 8. Kassel 1984 (b)

Minke, G.: Wärmedämmung mit Lehm, in: Minke, G. (ed.): Bauen mit Lehm, No. 6, Staufen 1987, p.5-9 (a)

Minke, G.: Blähton-Leichtlehm, eine Alternative zum Strohleichtlehm, in: Minke, G. (ed.): Bauen mit Lehm, No. 6, Staufen 1987, p.10-17 (b)

Minke, G.: Bauen mit Lehm - Erfahrungen beim Bau der Ökologischen Siedlung Kassel. Deutsche Bauzeitung (Stuttgart), No.7/1987, p.51-55 (c)

Minke, G.: Wohnen und Arbeiten in Gewölben aus Lehm, in: Wohnung + Gesundheit (Neubeuern) No. 61, 12/91, p.2-5 (a)

Minke, G.: India: Vault and dome Structure, in: Mimar (London) No.41, 12/91, p.66-69 (b)

Minke, G.: Design and Construction of Energy and Cost Saving Vault and Dome Structures, in: Proceedings of the International Symposium of Hassan Fathi for Architecture for the Poor, 20.-22. April 1993. Cairo (a)

Minke, G.: Wohnen und Arbeiten unter Lehmkuppeln, in: Wohnung + Gesundheit (Neubeuern), No.3/1993, p.1-4 (b)

Minke, G.: Humidity Control/Balancing humidity fluctuations, in: Bansal, Hauser, Minke: Passive Building Design, A Handbook of Natural Climatic Control. Amsterdam 1994, p.180-188

Minke, G.; Mukerji, K.: Structurally Optimized Domes - A Manual of Design and Construction. Braunschweig 1995

Minke, G.: Materialkennwerte von Lehmbaustoffen, in: Bauphysik (Berlin),No.4/95, p.124-130

Minke, G.: Waldorfkindergarten Sorsum, in: Wiese, K. (ed.): Modern bauen mit Lehm. Berlin 1998, p.143-148

Minke, G.; Mahlke, F.: Building With Straw, Basel/Berlin 2005

Mjartan, J.: Die volkstümliche Baukunst, in: Die slowakische Volkskultur. 1972. p.125-135

Möhler, K.: Grundlagen der Holzhochbaukonstruktionen, in: Götz, K.-HJ.; Hoor, D. et al.: Holzbauatlas. München 1978

Mukerji, K.: Soil Block Presses. GTZ, Eschborn 1986

Mukerji, K.: Soil Block presses: Product Information. GZT, Eschborn 1988

Ney, P.: Mineralogische Betrachtung des Lehmes des Felke Kurhauses Menschel in Meddersheim 1980, in: H.Dhonau, Th.Menschel (ed.): Die Felke-Kur, Schriftenreihe der Ärztlichen Arbeitsgemeinschaft für Felketherapie (Sobernheim), No.7, p.186

Niemeyer, R.: Der Lehmbau und seine praktische Anwendung. Hamburg 1946

Niemeyer, R.: Der Lehmbau (reprint). Grebenstein 1983

Nöcker, R.-M.: Heilerde. München 1985

OECD, Nuclear Energy Agency: Exposure to Radiation from Natural Radioactivity in Building Material, Report, Paris May 1979

Oestereich, V.: Entwurf und Bau eines Lehmofens, in: Minke, G. (ed.): Bauen mit Lehm, No. 1, Grebensteinn 1984, p.37f

Oliver, D.: Lehmbau in Australien, in: Minke, G. (ed.): Bauen mit Lehm, No.5, Freiburg 1986, p.55-57

Oliver, M.; Mesbah, A.: The earth as a material, in: Proceedings International Composium on Modern Earth Construction. Peking 1985

Pollak, E.; Richter, E.: Technik des Lehmbaus. Berlin 1952

Popposwamy, G.: Rural India. Village Houses in Rammed Earth. Stuttgart 1979

Priemer, R.: Lehmstampfbauten im Kreis Grimma (Diploma diss.), Humboldt-Universität. Berlin 1970

Pumpelly, R. (ed.): Explorations in Turkestan. Washington 1908

Raulin, H.: Lehmbau in Frankreich. 1984

Raw(en), J.: Cosmographia. Frankfurt 1757

Röhl, M.: Die Leichtlehmplatte, in: Neue Bauwelt 1947, No.43, p.684

Sachs, S.: Der verbesserte Pisé-Bau. Berlin 1822

Schick, W.: Der Pisé-Bau zu Weilburg an der Lahn. Weilburg 1987

Schmolitzky, O.: Thüringer Volkskunst. Weimar 1950

Schneider, J.: Am Anfang die Erde - sanfter Baustoff Lehm. Frankfurt 1985

Schreckenbach, H.: Construction Technology for a tropical developing country, Eschborn

Schuh: Der Lehmbau bei der Deutschen Reichsbahn, in: Die Reichsbahn, Amtliches Nachrichtenblatt der Deutschen Reichsbahn, No.25/26, 27/28, 1944

Schulze, W.: Die Felke-Kur. Frankfurt 1986

Sibtain, S.N.: To build a village - earthquake-resistant rural architecture, Parramatta, Australia 1982

Smith, R.G.; Webb, D.T.J.: Small Scale Manufacture of Stabilized Soil Bricks. Technical Memorandum No.12, International Labour Office. Genf 1987

Steen, A.S.; Steen, B.; Brainbridge, D.: The Straw Bale House, Chelsea Green Publ.Comp., White River Junction, Vermont, USA, 1994

Striedter, K.H.: Lehmarchitektur in Weilburg an der Lahn, in: Jean Dethier (ed.): Lehmarchitektur. München 1982. p.194-199

Stulz, R.; Mukerji, K.: Appropriate Building Materials. St.Gallen 1988

Turowski, R.: Entlastung der Rohstoff- und Primärenergiebilanz ..., Dissertation Universität Essen, 1977

United Nations Centre for Human Settlements (ed.): Earth Construction Technology, Nairobi 1992

Vanros, G.: Studie van bouwfysische Kenmerken van Lemen Vakwerkwanden. Leuven 1981, quoted at Volhard 1983

VITA (ed.): Village Technology Handbook. Mt.Rainier, USA 1970

Volhard, F.: Leichtlehmbau. Karlsruhe 1983

Vorhauer, K.: Low Cost / Self Help Housing (Gate Modul 6/6), Eschborn 1979

Voth, B.: Boden, Baugrund und Baustoff. Wiesbaden/Berlin 1978

Wagner, R.: Maschinelles Stampfen von Lehm, in: Neue Bauwelt, No.11/1949, p.164

Wehle, K.: Werkstoffe und Techniken der Malerei. Ravensburg, 5.edition 1985

Weiß, A.: Angewandte Chemie 75 (1963), p.755-762

Weller, K.; Rehberg, S.: Lösungsansätze für den energie- und rohstoffsparenden Wohnungsbau. DFG-Forschungsvorhaben, Fachgebiet Industrielles Bauen. TU Berlin 1979

Wendehorst, R.: Bautechnische Zahlentafeln, 25.edition. Stuttgart 1991

Wienands, R.: Die Lehmarchitektur der Pueblos. Köln 1983

Willoughby, D.R.; Gross, K.A., et al.: The Identification of Reaction-products in Alkali-stabilised Clays, in: Proceedings of the Fourth Conference of the Australian Road Research Board, Vol.4, Part 2, 1968, p.1386-1408

Winkler, H.G.F.: Bedeutung der Korngrößenverteilung grobkeramischer Erzeugnisse, in: Berichte der Deutschen keramischen Gesellschaft, Oct.1954, p.337-343

Wisser, S.; Knöfel, D.: Untersuchungen zu historischen Putz- und Mauermörteln, in: Bautenschutz und Bausanierung. No.5, 1988, p.163-171

Yazdani, H.

Erhöhung der Lebensdauer von Lehmbauten in erdbebengefährdeten Gebieten Afghanistans (Dissertation, Fachbereich Architektur, Gesamthochschule Kassel, 1985)

Zurheide, E.: Ein Backofen aus Lehmsteinen. Projektarbeit Fachhochschule Detmold, Febr. 1986 (not published)

zur Nieden, G.: Der Baustoff Lehm, in: Minke, G. (ed.): Bauen mit Lehm, No.1. Grebenstein 1984, p.21

zur Nieden, G.: Holzlehm, in: Wohnung + Gesundheit (Neubeuern), No.65, 1922, p.50-52

Más información sobre bioarquitectura en América del Sur, puede encontrarse en: *www.ecoaeco.com*

19. Créditos fotográficos

1.2-4	Gruner, D.
1.2-5	Yazdani, S.
1.2-6	Gerster-Rapho
1.2-9	Lauber, W.
5.3-5	Atlas-Copco
5.3-6	Heuser
5.6-6 a 5.6-9	Oliver, D.
5.6-10 y 5.6-11	Wolf, S.
5.6-12	CEPED
6.2-2	Bochow, K-H.
6.2-3	Lorenz-Ladener,C.
6.3-10	Consolid
6.3-11	Pacific Adobe
6.3-12 y 6.3-13	Weller, K.
7.2-5 y 7.2-6	Dufter, S.
8.2-6	Dressler, F.
8.2-7 y 8.2-8	Lukas, G.
14.2-2 y 14.2-3	Reynolds, M.
14.6-1	Schijns, W.
14.7-1	El Badwan, G.
14.7-2	Breshna
14.7-26 a 14.7-28	Yazdani, S.
14.7-45	Pilz, J.
15.3-4	Sibtain, S.N.
16.2	Bäumer, D.
16.8	Weiner, P.
16.9	Fahmy, A.
16.10 -1	Sandoval, R
16.10-2 y 16.10-3	Fischer, A.
16.11-1	Montoro, P.
16.14	Anderson, K.
16.16	Jonas, M
16.18	Fischer, A.
16.21-2	Schneider, J.
16.21-6	Glauser, Ph.
16.22-2	CRATerre
16.22-4	Mathisen, H.
16.17	Herzfeld, K.
16.15	Niset, C.
Todas las demás	Minke, G.

En casi todos los climas cálido-seco y templados del mundo, la tierra ha sido el material de construcción predominante. Aún en la actualidad un tercio de la humanidad vive en viviendas de tierra.

El **"Manual de construcción en tierra"** de Gernot Minke, está orientado al estudio de ese material de construcción y sus múltiples aplicaciones. Aunque basado en la versión original en alemán **"Lehmbau-Handbuch"**, ha sido modificado en su contenido para satisfacer las expectativas de lectores de diferentes nacionalidades, incluyendo ejemplos de nuevos proyectos y una mayor cantidad de ilustraciones y fotografías que lo enriquecen y facilitan su comprensión.

Esta segunda edición del manual documenta la mayoría de los experimentos desarrollados hasta la fecha, completados y corregidos a través de investigaciones continuas iniciadas en 1978 en el "Forschungslabor für experimentelles Bauen" (FEB) (Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales) de la Universidad de Kassel.

ISBN 9974-49-347-1

